



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STAVEBNÍ**  
**ÚSTAV STAVEBNÍHO ZKUŠEBNICTVÍ**

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING  
INSTITUTE OF BUILDING TESTING

# **MOŽNOSTI HODNOCENÍ TRVANLIVOSTI POVRCHOVÉ VRSTVY BETONU STAVEBNÍCH KONSTRUKCÍ**

POSSIBILITIES OF EVALUATION DURABILITY OF THE SURFACE LAYER OF CONCRETE  
STRUCTURES

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**  
MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**BC. MICHAL BLAŽEK**

**VEDOUcí PRÁCE**  
SUPERVISOR

**doc. Ing. TOMÁŠ VYMAZAL, Ph.D.**

BRNO 2014



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

<b>Studijní program</b>	N3607 Stavební inženýrství
<b>Typ studijního programu</b>	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
<b>Studijní obor</b>	3607T009 Konstrukce a dopravní stavby
<b>Pracoviště</b>	Ústav stavebního zkušebnictví

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

<b>Diplomant</b>	Bc. Michal Blažek
<b>Název</b>	Možnosti hodnocení trvanlivosti povrchové vrstvy betonu stavebních konstrukcí
<b>Vedoucí diplomové práce</b>	doc. Ing. Tomáš Vymazal, Ph.D.
<b>Datum zadání diplomové práce</b>	31. 3. 2013
<b>Datum odevzdání diplomové práce</b>	17. 1. 2014
V Brně dne 31. 3. 2013	

.....  
prof. Ing. Leonard Hobst, CSc.  
Vedoucí ústavu

.....  
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA  
Děkan Fakulty stavební VUT

## **Podklady a literatura**

1. Kucharczyková B., Plšková I., Adámek J. Metody zkoušení trvanlivostech vlastností betonu. In Sborník příspěvků konference Zkoušení a jakost ve stavebnictví 2007. Kloknerův ústav ČVUT. Praha. 2007. p. 179 - 184. ISBN 978-80-01-03794-2.
2. Misák P., Kucharczyková B., Vymazal T. Určování kvality povrchové vrstvy betonu metodou TPT a stanovení vlivu vlhkosti na hodnotu součinitele vzduchové propustnosti. In Zborník konference Stavebné materiály a skúšobníctvo. Slovenská republika, Technický a skúšobný ústav stavební, n.o. Bratislava. 2008. p. 179 - 183.
3. KUCHARCZYKOVÁ, B.; MISÁK, P.; VYMAZAL, T. The Air Permeability Measurement by Torrent Permeability Tester. In The 10th International Conference Modern Building Materials, Structures and Techniques - Selected papers - Vol. I. Lithuania. 2010. p. 162 - 166. ISBN 978-9955-28-593-9.
4. ČSN EN 12390-8 Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 8: Hloubka průsaku tlakovou vodou, ÚNMZ, 2009
5. ČSN EN 731326 Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek, ÚNMZ, 2003
6. ČSN P CEN/TS 12390-9 Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 9: Odolnost proti zmrazování a rozmrazování - Odlupování

## **Zásady pro vypracování**

1. Úvod - stručný úvod do problematiky diplomové práce
2. Cíl práce - vypracovat přehled metod pro hodnocení povrchových vrstev betonu dle zazdané literatury a podkladů.
3. Teoretická část - rešerše doporučené literatury a vypracování podkladů pro řešení diplomové práce se zaměřením na vzájemné porovnání výsledků a výkonnosti metod pro hodnocení povrchových vrstev betonu.
4. Experimentální část - provedení a hodnocení měření trvanlivosti povrchových vrstev betonu různými metodami.
5. Závěr - shrnutí výsledků, deklarace výsledků diplomové práce, diskuze výsledků s odbornou literaturou.

## **Předepsané přílohy**

.....  
doc. Ing. Tomáš Vymazal, Ph.D.  
Vedoucí diplomové práce

## **Abstrakt**

Diplomová práce pojednává o možnostech hodnocení trvanlivosti povrchové vrstvy betonu stavebních konstrukcí. Trvanlivost povrchové vrstvy betonu zpravidla rozhoduje o trvanlivosti konstrukce jako celku. Aby mohla být vyjádřena trvanlivost konstrukce, musí být jasně definováno, v jakém prostředí bude konstrukce umístěna a jakým vlivům musí odolávat. Pro stanovení odolnosti konstrukce proti jednotlivým vlivům existuje celá řada normových předpisů. V teoretické části této práce je vypracován přehled těch nejznámějších a nepoužívanějších předpisů. V poslední době se objevují snahy odhadovat trvanlivost povrchové vrstvy betonu na základě zkoušek stanovujících propustnost betonu. Dále je tedy zpracován přehled těchto metod stanovujících propustnost a v experimentální části této práce, jsou výsledky metod porovnány. Pórová struktura a propustnost betonu jsou klíčové parametry pro trvanlivost betonové konstrukce. Tyto parametry zároveň ovlivňují i konstrukční vlastnosti betonu, a proto se v této práci pojednává i o vztahu pórové struktury a pevnosti betonu v tlaku.

## **Klíčová slova**

Trvanlivost, propustnost, betonové konstrukce, porozita, mrazuvzdornost, rozmrazovací látky, pevnost betonu v tlaku.

## **Abstract**

The thesis is focused on possibilities of durability evaluation of surface layer of concrete structures. The durability of concrete surface layer usually determines the durability of the structure as a unit. It has to be determined in what environment the structure is situated and what influences it has to face, to set the durability of the structure. There is a several normative prescription to set the resistance of the structure. There is formulated a summary of the most widely used and known prescriptions in the theoretical part of the thesis. It is a lot of effort to estimate the durability of the concrete by estimation of permeability of the concrete surface layer recently. Thus these methods are also formulated in the summary and there are compared the individual outputs of the tests. The permeability and pore structures of the concrete surface layer are crucial parameters for the durability of concrete structure. These parameters influence the construction properties of the concrete as well, thus the thesis is focused on relationship of the pore structure and the strength in press of the concrete.

## **Keywords**

Durability, permeability, concrete structures, porosity, freeze-thaw resistance, de-icing agents, strength in the press of concrete.



## **Bibliografická citace VŠKP**

Bc. Michal Blažek *Možnosti hodnocení trvanlivosti povrchové vrstvy betonu stavebních konstrukcí*. Brno, 2014. 70 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavebního zkušebnictví. Vedoucí práce doc. Ing. Tomáš Vymazal, Ph.D..

**Prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 17.1.2014

.....  
podpis autora  
Bc. Michal Blažek

Rád bych poděkoval doc. Ing. Tomáši Vymazalovi, Ph.D. za podporu, kterou mi poskytl při tvorbě této práce.

---

**Obsah**

<b><u>1</u></b>	<b><u>ÚVOD</u></b>	<b><u>9</u></b>
1.1	Úvodní část	9
1.2	Cíle práce	9
<b><u>2</u></b>	<b><u>TRVANLIVOST BETONU</u></b>	<b><u>10</u></b>
2.1	Princip návrhu trvanlivého betonu	10
2.2	Pórovitost a propustnost betonu	12
2.2.1	Vodní propustnost betonu	13
2.2.2	Vzdušná propustnost betonu	15
2.3	Pórovitost a pevnost betonu v tlaku	16
<b><u>3</u></b>	<b><u>HODNOCENÍ POVRCHOVÉ VRSTVY BETONU</u></b>	<b><u>20</u></b>
3.1	Metody hodnocení trvanlivosti betonu podle normativních předpisů	20
3.1.3	Hloubka průsaku tlakovou vodou	22
3.1.4	Mrazuvzdornost dle ČSN 73 1322	23
3.1.5	Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek	23
3.1.6	Odolnost proti zmrazování a rozmrazování- Odlupování	26
3.1.7	Zkoušení odolnosti betonu proti zmrazování a rozmrazování - Porušení vnitřních struktur	28
3.2	Hodnocení povrchové vrstvy betonu NDT metodami	30
3.2.1	Metoda Germanns Water Permeability Test	30
3.2.2	Metoda Torrent Permeability Tester	31
3.2.3	Metoda Initial Surface Absorption Test	33
3.3	Vliv vlhkosti betonu	35
3.4	Porozimetrie betonu	36
<b><u>4</u></b>	<b><u>EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST</u></b>	<b><u>38</u></b>
4.1	Výroba betonu	38
4.2	Zkoušení betonu	40

	<b>Obsah</b>
<b><u>5</u></b>	<b><u>VÝSLEDKY MĚŘENÍ</u></b>
5.1	Vlastnosti čerstvého betonu 44
5.2	Pevnost betonu v tlaku a objemová hmotnost 44
5.3	Mrazuvzdornost a odolnost proti vodě a rozmrazovacím látkám 45
5.3.1	Mrazuvzdornost 45
5.3.2	Odolnost betonu proti vodě a chemickým rozmrazovacím látkám 50
5.4	Nedestruktivní metody hodnocení 51
5.4.1	Torrent Permeability Tester 51
5.4.2	Germanns Water Permeability Test 53
5.4.3	Initial Surface Absorbation Test 56
5.5	Porozimetrie 60
<b><u>6</u></b>	<b><u>ZÁVĚR</u></b>
6.1	Hodnocení trvanlivosti povrchové vrstvy betonu 61
6.2	Odhad teoretické pevnosti betonu na základě jeho porozimetrie 63
<b><u>7</u></b>	<b><u>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ</u></b>
7.1	Skripta a opory 65
7.2	Normy 65
7.3	Články 66
7.4	www zdroje 66
<b><u>8</u></b>	<b><u>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ</u></b>
<b><u>9</u></b>	<b><u>SEZNAM OBRÁZKŮ, GRAFŮ A TABULEK</u></b>
9.1	Seznam obrázků 68
9.2	Seznam grafů 68
9.3	Seznam tabulek 69

# 1 ÚVOD

## 1.1 Úvodní část

Při návrhu a výrobě stavební konstrukce se vždy nejvíce dbalo a dbá na splnění požadavků pro účel a funkci konstrukce, dále na její spolehlivost a cenu. Trvanlivost stavebních konstrukcí je často opomíjeným nebo zanedbávaným požadavkem, i když může v relativně krátkém časovém horizontu ohrozit všechny zmíněné hlavní požadavky na konstrukci. Problém spočívá v tom, že trvanlivost konstrukce je vlastnost, která se velmi obtížně prokazuje již při jejím zhotovení. Další nepříznivou vlastností trvanlivosti konstrukce je fakt, že prodraží konstrukci, aniž by způsobila viditelné vylepšení v krátkodobém horizontu. Tyto skutečnosti vedou k šetření investora i dodavatele právě na úkor trvanlivosti. Stavby pozemního stavitelství se obvykle navrhují na životnost 50 let, dopravní stavby na 100 let. Aby stavba sloužila svému účelu po celou dobu její životnosti s minimálními náklady na údržbu a opravy, je třeba vynaložit určité finance do její adekvátní trvanlivosti. V opačném případě se taková stavba může značně prodražit. Správnost tohoto přístupu potvrzuje i fakt, že do dokumentu CPR (Construction Products Regulation) byl přidán požadavek na trvanlivost jako nový - sedmý požadavek. Tato práce se věnuje výzkumu trvanlivosti povrchových vrstev betonu. K zajištění trvanlivosti betonu je nutné přistoupit z hlediska návrhu receptury betonu. Trvanlivost betonu totiž ovlivňuje i konstrukční vlastnosti betonu, jako celku.

## 1.2 Cíle práce

Cílem této práce je vypracovat přehled metod pro hodnocení povrchových vrstev betonu a aplikovat tyto metody na experimentu. Dále zpracovat metody známé z normových předpisů i metody novější, které u nás zatím nenašly větší uplatnění. V poslední době se objevují snahy odhadovat trvanlivost betonu z propustnosti povrchové vrstvy, která s touto problematikou úzce souvisí. Měření propustnosti je nedestruktivní zkouškou, navíc časově nenáročnou. Bylo by tedy velkým přínosem, alespoň z části jimi nahradit metody, které stanovují trvanlivost betonu prostřednictvím zdlouhavých a tudíž i nákladných zmrazovacích cyklů. Dalším cílem je objasnění vztahu porozimetrie betonu k trvanlivosti i ostatním návrhovým parametrům betonu.

## 2 TRVANLIVOST BETONU

Výraz „trvanlivost betonu“ je obecně velice snadno zařaditelným pojmem. Každý tuší, co si pod tímto pojmem představit. Při hlubším zamyšlení však pohled na věc není tak prostou záležitostí. Vždy bychom totiž měli mluvit o trvanlivostech betonu, přičemž je nutné specifikovat v jakém prostředí je beton uložen a namáhán.

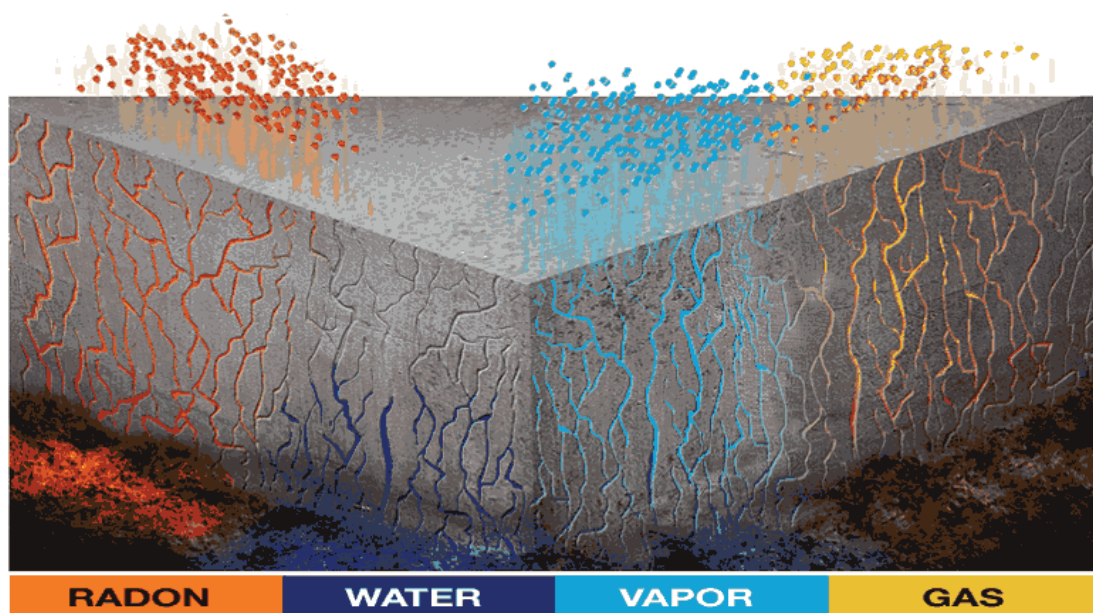
Vlivy působící na trvanlivost betonu by se daly rozdělit do vlivů vnitřních a vnějších. Vnitřními vlivy můžou být míněny např. chloridy, které se do betonu dostaly s urychlovači tuhnutí nebo alkálie přítomné v cementu, které mohou následně reagovat s reaktivními složkami kameniva. Mezi vnější vlivy bývají řazeny chloridové ionty, oxid uhličitý, sírany, zmrazovací cykly, bakterie, abraziva atd. Pokud se tedy mluví o trvanlivosti betonu a předpokládáme uložení v síranovém prostředí, měl by být použit síranuvzdorný cement, pokud bude beton vystaven působení mrazu a vody, má být automaticky navrhnout jako provzdušněný [1-1].

### 2.1 Princip návrhu trvanlivého betonu

Pro návrh trvanlivého betonu je třeba mít na paměti několik souvislostí, které budou následovně osvětleny. Problémů, které vedou k nedostatečné trvanlivosti konstrukce je více a většinou působí společně tak, že mají za následek nekvalitní, netrvanlivou konstrukci.

Jedním z hlavních důvodů proč se tak často setkáváme s porušením betonových konstrukcí, je fakt, že největší důležitost se při návrhu klade pevnosti v tlaku, nikoliv vlivům prostředí [1-1]. Dobrým příkladem by mohlo být patrové garážové stání pro osobní automobily. Pevnost betonu v tlaku, například pro nosné pilíře, z hlediska prvního a druhého mezního stavu lze navrhnout kolem  $20 \text{ N/mm}^2$ . Z hlediska trvanlivosti toto řešení nejspíše nebude příliš vhodné. Problém spočívá v tom, že nejsme schopni levně vyrobit beton o pevnosti  $20 \text{ N/mm}^2$  tak, aby vzdoroval agresivnímu prostředí, které bude v garážích působit [1-1]. První cestou by bylo chránit takový beton proti korozi výztuže různými ochrannými nátěry, pozinkováním, katodovou ochranou. Taková ochrana bývá zpravidla velmi nákladná. Nebylo by tedy vhodnější navrhnout konstrukční beton vyšší pevnosti? Např. pevnosti 60 až  $100 \text{ N/mm}^2$ . Beton o vyšší pevnosti bude pravděpodobně disponovat mnohem menší pórovitostí a propustností, což povede ke značnému navýšení trvanlivosti takového betonu. Beton o vyšší pevnosti

bude totiž mít mnohem menší vodní součinitel, který kladně ovlivní pórovitost a propustnost. Jak je na tomto příkladu patrné, je třeba věnovat pozornost při návrhu dostatečně trvanlivé konstrukce každému detailu.



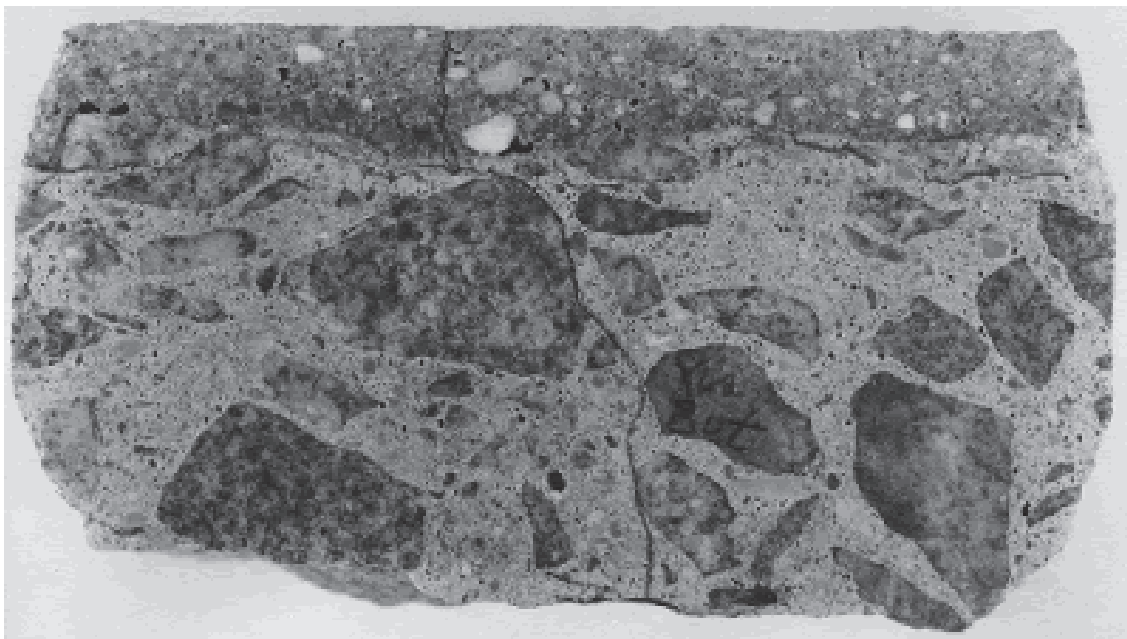
**Obrázek 2-1** Propustnost betonu [4-1]

Použití betonu s nízkým vodním součinitelem není jediným aspektem, na který je třeba brát ohled. Dále si musíme být jisti, že beton je náležitě ukládán a ošetřován. Pokud je beton převibrován, dochází k odlučování cementového mléka i v betonech s velmi nízkým vodním součinitelem. Mléko se hromadí pod velkými zrny kameniva, přičemž ke stejnému efektu dochází u výztuže a stěn forem. V této oblasti poté při tuhnutí a tvrdnutí dochází k tvorbě sítě drobných kapilár, kterými mohou být do betonu penetrovány škodlivé ionty, způsobující jeho předčasnou degradaci. Stejně jako v případě převibrování, může dojít k vytvoření sítě kapilár při předčasném vyschnutí betonu. Ochránit povrch betonu před předčasným vysycháním je jednou z prvořadých záležitostí.

Dalším aspektem, který nebývá brán příliš často v potaz, je důležitost tzv. pokožky betonu. Beton je z makroskopického hlediska uvažován (počítán) jako homogenní materiál. Z hlediska v řádů centimetrů se jednoznačně jedná o heterogenní materiál. Dlouhodobě se na něj pohlíželo jako na dvoufázový materiál. V současné době se často mluví o materiálu třífázovém. Krom kameniva a cementové pasty se totiž uvažuje další oblast, a to je tzv. přechodná (tranzitní) zóna. Přechodná zóna je zóna na rozhraní mezi kamenivem a cementovou pastou. Většinou se jedná o nejslabší místo betonu, protože pokud dojde ke kolapsu, lom je veden právě přechodovou oblastí, viz. (Obr. 2-2)



(výjimkou mohou být vysokopevnostní betony nebo naopak lehké betony, kde rozhoduje pevnost kameniva).



**Obrázek 2-2** *Lom v přechodové oblasti [4-2]*

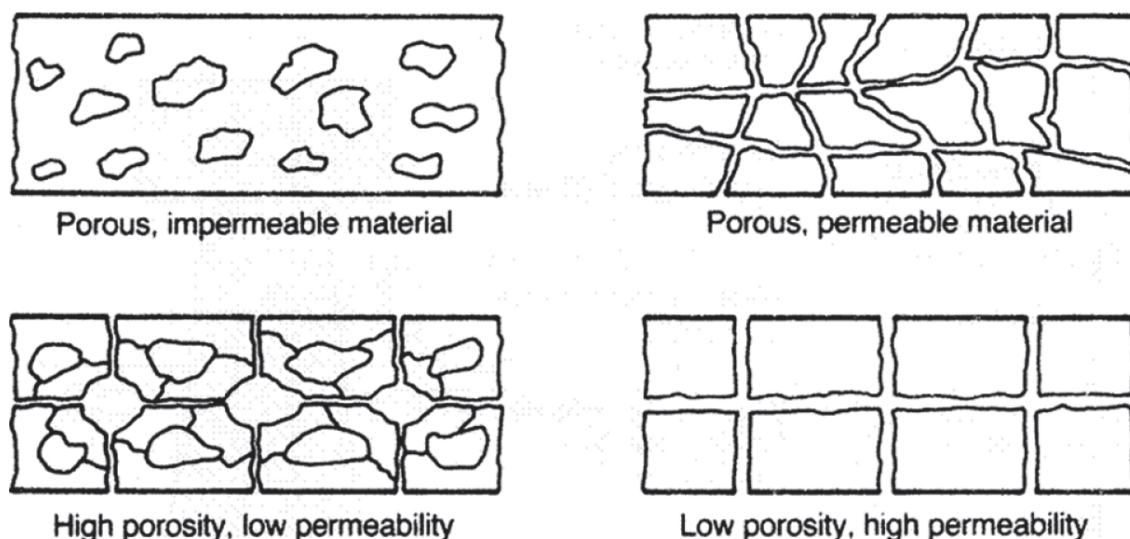
Stejně má přechodová zóna zásadní vliv na trvanlivost. Jedná se totiž o místo s velmi vysokým vodním součinitelem. Dále je třeba zmínit, že u vysokohodnotných betonů není vliv přechodové zóny tak patrný, proto někdy mluvíme pouze o dvoufázovém prostředí. Pro výrobu vysokohodnotných betonů je bohatě užíváno plastifikátorů, superplastifikátorů, urychlovačů tuhnutí a jiných přísad a příměsí. Právě díky použití těchto látek dochází k vytvoření tzv. pokožky betonu v tloušťce 5 až 10 mm. Pokožka betonu má vlivem těchto látek a větší absence zrn kameniva úplně jinou mikrostrukturu než zbytek masivního betonu, a to sice v místě, které je pro trvanlivost betonu klíčové [1-1].

### 2.2 Pórovitost a propustnost betonu

O důležitosti charakteru povrchové vrstvy, zejména její pórové struktury a propustnosti, bylo zmíněno již v předchozích odstavcích. Pro hlubší pochopení těchto vlastností a pro schopnost je modifikovat je třeba těmto procesům lépe porozumět.

Možnost prostupu vody (čisté či nesoucí agresivní ionty), oxidu uhličitého a kyslíku betonovou vrstvou je rozhodujícím aspektem pro ovlivnění trvanlivosti takového betonu. Tyto látky se mohou betonem pohybovat různými mechanismy, nejvíce záleží na struktuře cementové pasty, která umožňuje prosáknout médiu skrz beton. Tedy na propustnosti (permeabilitě) [1-2]. Dále také záleží na difuzní schopnosti a savosti

betonu. Přestože mluvíme o souhře všech těchto mechanismů působících společně, je stále užíváno termínu propustnost. Ve vědeckých kruzích převažuje názor, že pórovou strukturu povrchové vrstvy betonu nejlépe vystihují zkoušky propustnosti. Tento názor lze obhajovat či vyvracet na základě úvahy dle následujícího obrázku (Obr. 2-3). Je zřejmé, že zkoušky propustnosti nemusí zcela vystihnout pórovou strukturu vzorku. Na druhou stranu, na obrázku se nacházejí, extrémní případy, které u většiny betonů nenastanou a zkoušky propustnosti jsou tedy dostačující.



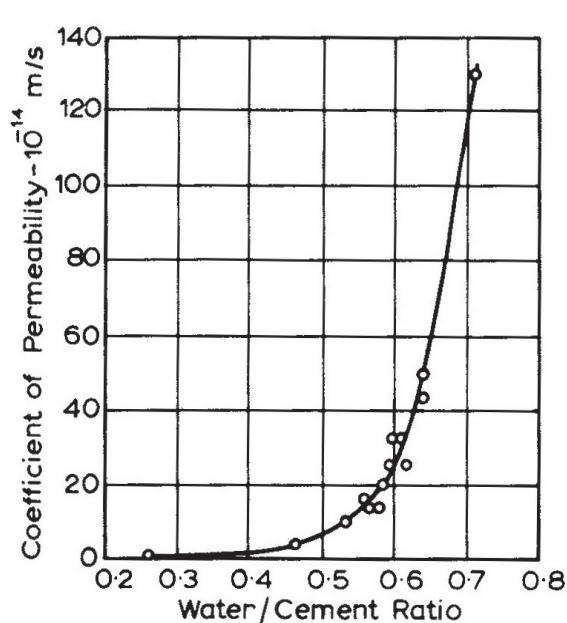
**Obrázek 2-3** Pórová struktura betonu- pórovitý, nepropustný materiál; pórovitý, propustný materiál; velmi pórovitý, málo propustný materiál; málo pórovitý, velmi propustný materiál (ve směru hodinových ručiček) [1-3]

### 2.2.1 Vodní propustnost betonu

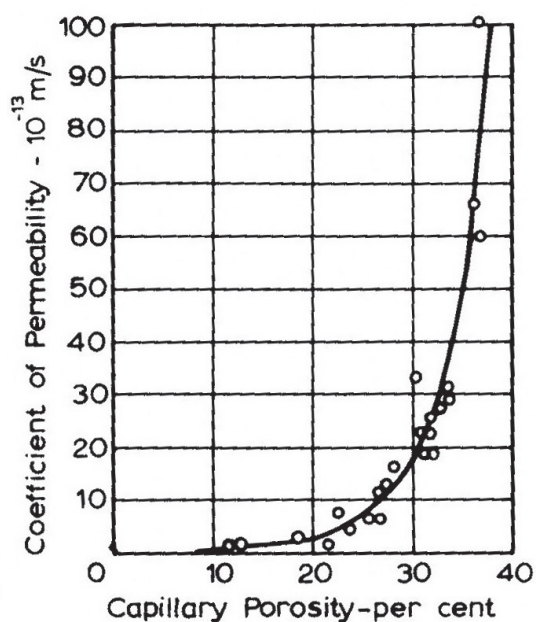
Vodní propustnost betonu, čili schopnost betonu propouštět vodu není funkcí pouze porozity betonu, ale záleží také na velikosti, rozmístění, tvaru, natočení a průběžnosti pórů. Vodní propustnost závisí zejména na kapilární pórovitosti zkoušeného betonu, nebo lépe řečeno pórovitosti cementové pasty. Propustnost kameniva bývá zpravidla mnohem menší než propustnost cementového tmele (s výjimkou u pórovitých kameniv). Důvody jsou takové, že voda prochází mnohem snadněji kapilárními póry než póry gelovými, které jsou několikrát menší [1-2]. O pravdivosti tohoto tvrzení se můžeme přesvědčit z grafu 2-2.

Jak již bylo řečeno, nejvíce záleží na kapilární pórovitosti cementové pasty. Důležitými faktory, které zásadně mohou ovlivnit poměr kapilárních a gelových pórů v cementové pastě jsou stupeň hydratace a vodní součinitel. Čím více je beton vyzrálější, tím vyšší je

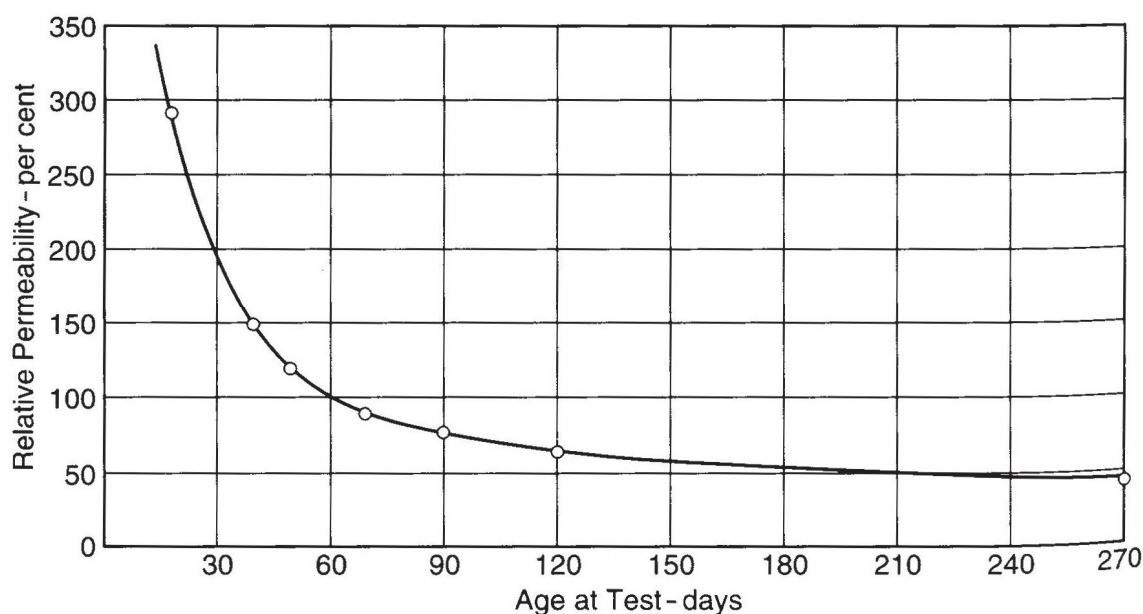
stupeň hydratace a menší je podíl gelových pórů v betonu. Obecně řečeno, čím je beton starší, tím jeho propustnost klesá. O tom, že vyšší vodní součinitel dokáže negativně ovlivnit propustnost betonu jsme se dozvěděli již v předešlých odstavcích, nyní však již víme, že je to právě díky většímu podílu kapilárních pórů. Oba dva jevy můžeme pozorovat v grafech 2-1 a 2-3[1-2].



**Graf 2-1** Závislost propustnosti na vodním čísle betonu [1-2]



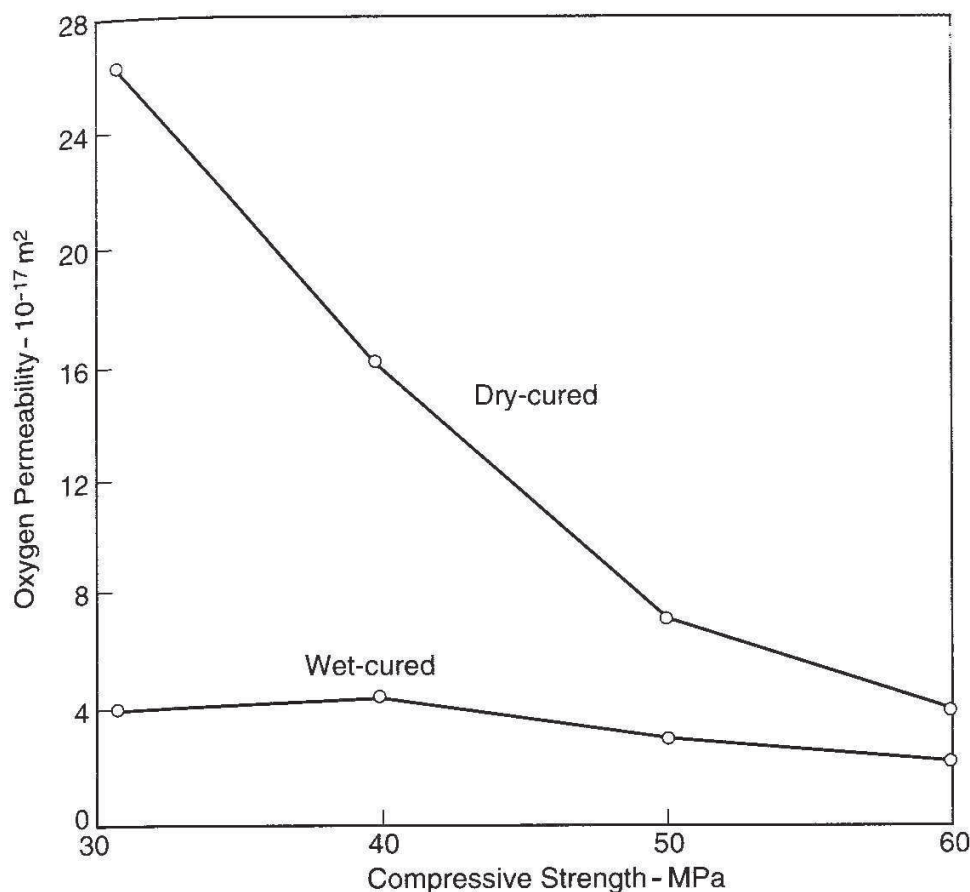
**Graf 2-2** Závislost propustnosti betonu na kapilární porositě [1-2]



**Graf 2-3** Závislost propustnosti na stáří betonu [1-2]

### 2.2.2 Vzdušná propustnost betonu

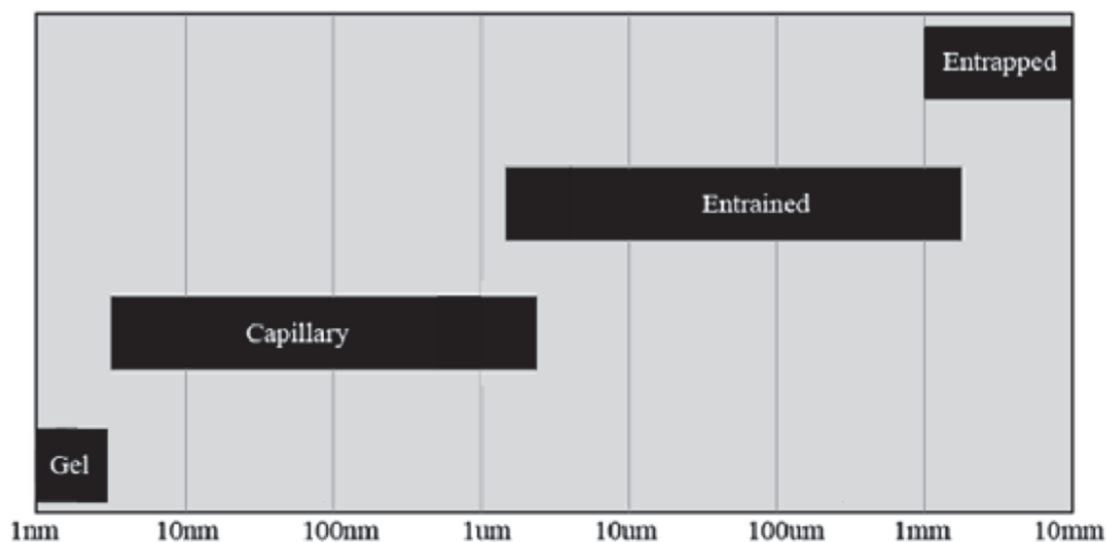
Vzdušná propustnost betonu, čili schopnost betonového vzorku propouštět plyny závisí stejně jako u vodní propustnosti na podílu pórů, tím pádem nepřímo na vodním součiniteli a pevnosti betonu [1-2]. Velký vliv má závislost na vlhkosti betonu. Čím větší vlhkost betonu, tím menší vzdušná propustnost betonu. Pokud má totiž dojít k průniku plynu, musí být nejdříve vytlačena voda přítomná v pórech betonu. Tyto závislosti můžeme pozorovat v následujícím grafu (Graf 2-4), kde je vynesena závislost vzduchové propustnosti na pevnosti betonových vzorků ošetřovaných vodou a vzorků vodou neošetřovaných. U vzorků náležitě ošetřovaných vodou vzniklo daleko méně kapilárních pórů, a proto je vzduchová propustnost značně menší [1-2].



**Graf 2-4** Závislost vzdušné propustnosti betonu ošetřovaného v suchých a vlhkých podmínkách na pevnosti v tlaku [1-2]

### 2.3 Pórovitost a pevnost betonu v tlaku

O velkém vlivu propustnosti a pórovitosti na trvanlivost betonové vrstvy je pojednáváno ve větší části této práce. O závislosti pórovitost - pevnost betonu v tlaku se však mnoho studií doposud nezaobíralo. Osvětlit tuto závislost může být velmi užitečné. V současnosti je postup při návrhu běžného betonu takový, že se vychází zejména z požadavku na pevnost betonu, popřípadě na modul pružnosti betonu. Poté může být přidán požadavek například na provzdušnění betonu v procentech, které může zajistit vyšší odolnost proti mrazu při použití rozmrazovacích látek. V poslední době se objevují názory, že provzdušnění betonu v procentech není dostatečná informace viz. [3-5]. V provzdušněném betonu se nachází široká škála pórů různých velikostí, viz. Obr. 2-4. Ne všechny póry jsou efektivní pro požadovanou vlastnost. Poslední studie tvrdí, že procentu účinného provzdušnění (průměr pórů 0,001-1,0 mm) nad 2% může značně zvýšit odolnost proti vodě a chemickým rozmrazovacím látkám [3-5]. Právě z tohoto důvodu může v budoucnu růst potřeba podrobnější znalosti porozimetrie daného betonu. Poté můžeme tyto znalosti úspěšně aplikovat při návrhu dostatečně trvanlivé a ekonomické konstrukce.

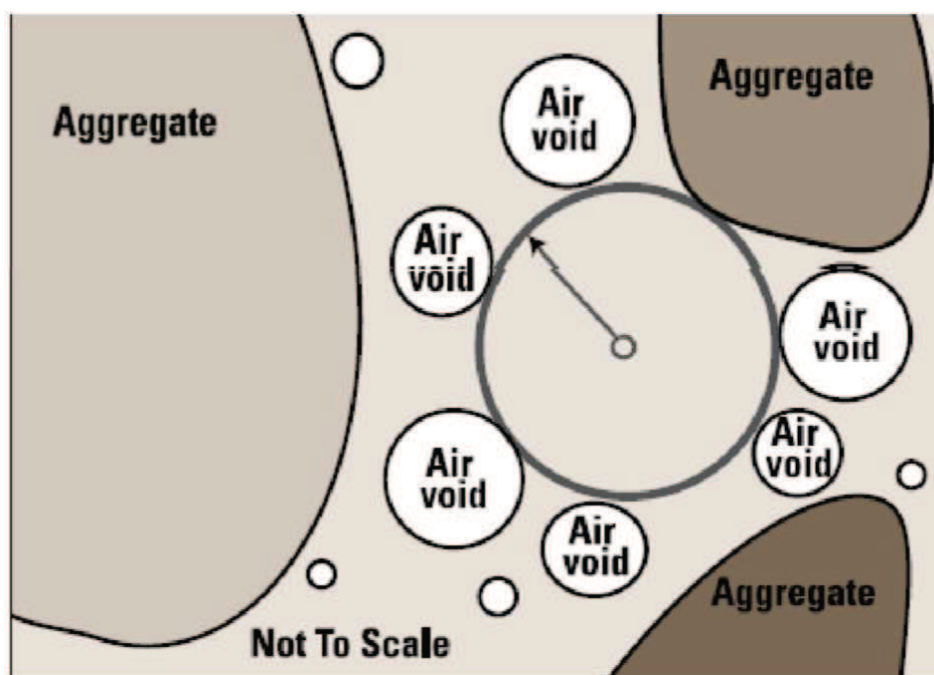


**Obrázek 2-4** Příklad zastoupení jednotlivých velikostí pórů v betonu (gelové póry, kapilární póry, záměrně přidané póry, póry vzniklé například nedokonalým zhutňováním) [3-5]

Kromě velikosti pórů je pro popis pórové struktury betonu důležité i rozložení pórů. Pro tento popis se používá tzv. spacing faktor. Spacing faktor je maximální průměrná vzdálenost pórů od libovolného místa v betonu. Schéma spacing faktoru je znázorněno

v Obr. 2-5. Některé studie uvádějí, že spacing faktor menší než 0,2 mm společně s provzdušněním 4-6% by měl zajistit dobrou odolnost betonu proti zmrazování a rozmrazování. Dále může být pro přesnější popis pórové struktury použito například parametru PSD (pore size distribution parameters). Popis je tvořen těmito parametry:

- $r_{0,5}$  – střední hodnota poloměrů pórů v betonu
- $d$  – koeficient rozmístění pórů v betonu
- $P$  – propustnost



**Obrázek 2-5** Spacing faktor [3-5]

V minulosti byla snaha popsat závislost pórovitosti na pevnosti betonu. Bylo vytvořeno několik modelů, které měli vystihovat tuto závislost viz. graf 2-5. Ve stejném grafu můžeme pozorovat výsledky experimentu autorů Kumara a Bhattacharje [3-6]. Výsledky pevnosti zkoušených vzorků jsou v grafu značeny kolečkem pro betony s drceným kamenivem a trojúhelníkem pro betony s drceným keramickým střepem, použitým místo kameniva. Výsledky experimentu neprokázali uspokojivou shodu ani s jedním existujícím modelem. Existují i novější vztahy popisující tuto závislost (*Atzeni, Luping* [3-6]). Tyto vztahy jsou sofistikovanější a závislé na více parametrech než jen na pórovitosti, ani tady však nebyla prokázána shoda s výsledky experimentu. Na základě experimentu byl vytvořen nový vztah (1), který vykazuje uspokojivou shodu s naměřenými daty.

$$\sigma = \kappa \cdot f_{ca} \cdot f_e \cdot f_a \cdot f_T \cdot C \cdot \frac{(1-p)}{\sqrt{r_m}} \quad (1)$$

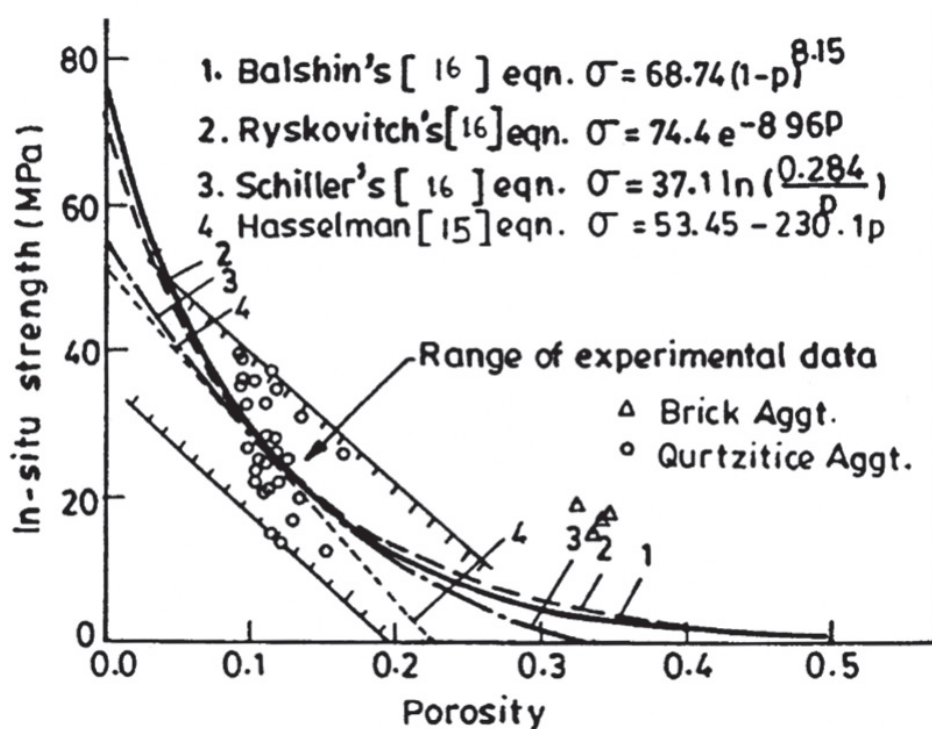
$\sigma$	pevnost $[N.m^{-2}]$
$p$	porozita $[-]$
$r_m$	střední hodnota poloměrů pórů $[m]$
$C$	podíl cementu v betonu $[-]$
$f_{ca}$	faktor použitého kameniva $[-]$
$f_e$	faktor prostředí $[-]$
$f_a$	faktor stáří $[-]$
$f_T$	faktor teploty $[-]$
$\kappa$	empirická konstanta $[N.m^{-1.5}]$

K podobnému závěru se dopracovali i autoři Das a Kondraivendhan [3-7]. Vztah (2) je velice podobný vztahu předešlému (1). Jediná odlišnost spočívá v konstantě před zlomkem. Ve vztahu (2) je tato konstanta označena K. Ve vztahu (1) je konstanta  $\kappa$  navíc upřesněna součinem více faktorů se snahou, do ní promítnout různé vlivy působící při tvrdnutí betonu. Ve stanovení těchto konstant spočívá největší problém. O tom, že závislost pevnosti na hlavní části vztahů (1) a (2) je pravdivá, svědčí graf 2-6 s výstupy z experimentu, publikovanými Kumarem a Bhattacharjem [3-6].

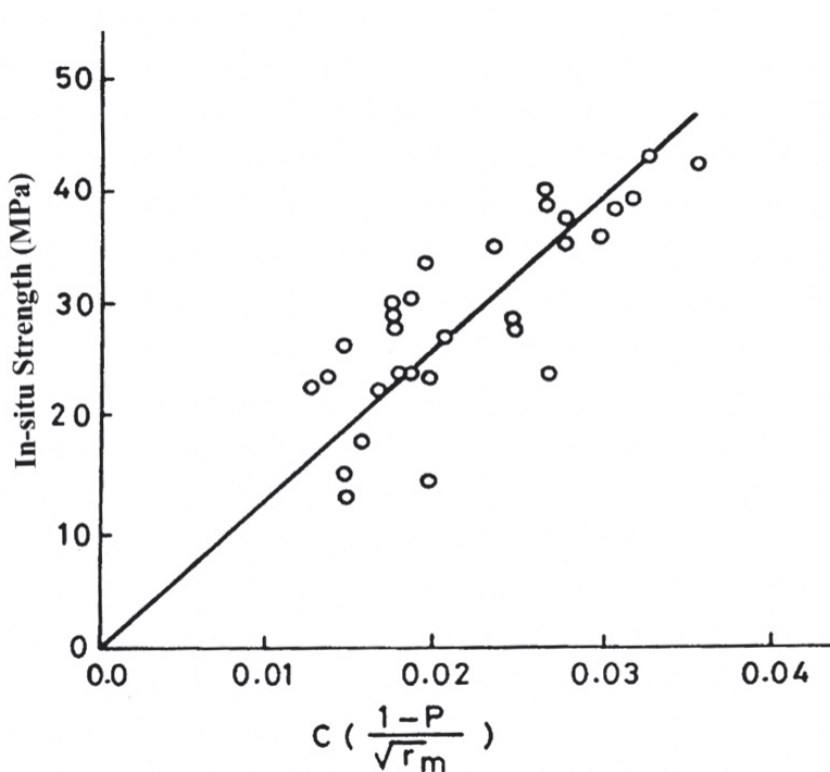
$$\sigma = K \cdot C \cdot \frac{(1-p)}{\sqrt{r_m}} \quad (2)$$

$\sigma$	pevnost $[N.m^{-2}]$
$p$	porozita $[-]$
$r_m$	střední hodnota poloměrů pórů $[m]$
$C$	podíl cementu v betonu $[-]$
$K$	empirická konstanta $[N.m^{-1.5}]$





Graf 2-5 Existující modely znázorňující závislost pevnosti betonu na porozitě



Graf 2-6 Závislost pevnosti betonu na hlavní části výrazu z rovnic (1) a (2) [3-7]



### 3 HODNOCENÍ POVRCHOVÉ VRSTVY BETONU

Hodnocení stávajících betonových konstrukcí z hlediska aktuální trvanlivosti není jednoduchou otázkou. Pojmem „aktuální trvanlivost“ je myšlen stav konstrukce v daný okamžik, tedy dnes. Největším problémem při hodnocení konstrukce se jeví trvanlivost konstrukce, přičemž trvanlivostí konstrukce rozumíme schopnost konstrukce odolávat účinkům prostředí, ve kterém se nachází, a to po celou dobu její životnosti. Při hodnocení trvanlivosti je nutné vyhodnotit návrh a výrobu konstrukce, kvalitu údržby a také je důležitá znalost environmentálních podmínek, ve kterých se konstrukce po celou dobu existence nacházela. K hodnocení se používá soubor trvanlivostních charakteristik, který hodnotí povrchovou vrstvu betonu v tloušťce 30 až 60 mm. Existuje řada zkoušek, na základě kterých lze hodnotit povrchovou vrstvu betonu. V dalších podkapitolách jsou popsány jak zkoušky standardizované (myšleno zkoušky popsané v normativních předpisech), tak zkoušky, které hodnotí propustnost povrchové vrstvy a na základě propustnosti se stanovuje trvanlivost [3-1].

#### 3.1 Metody hodnocení trvanlivosti betonu podle normativních předpisů

V současné době je trvanlivost stavebních materiálů aktuálním tématem. Svědčí o tom fakt, že trvanlivost byla navržena orgány evropské unie v dokumentu CPR (Construction Products Regulation) jako nový - sedmý požadavek. Jsou tedy zkoumány nové způsoby hodnocení trvanlivosti, a to i v oblasti betonových konstrukcí. V této podkapitole jsou shrnuty metody starší i nové, které se nejčastěji používají k hodnocení trvanlivosti betonové konstrukce, či konstrukčního betonu [3-2].

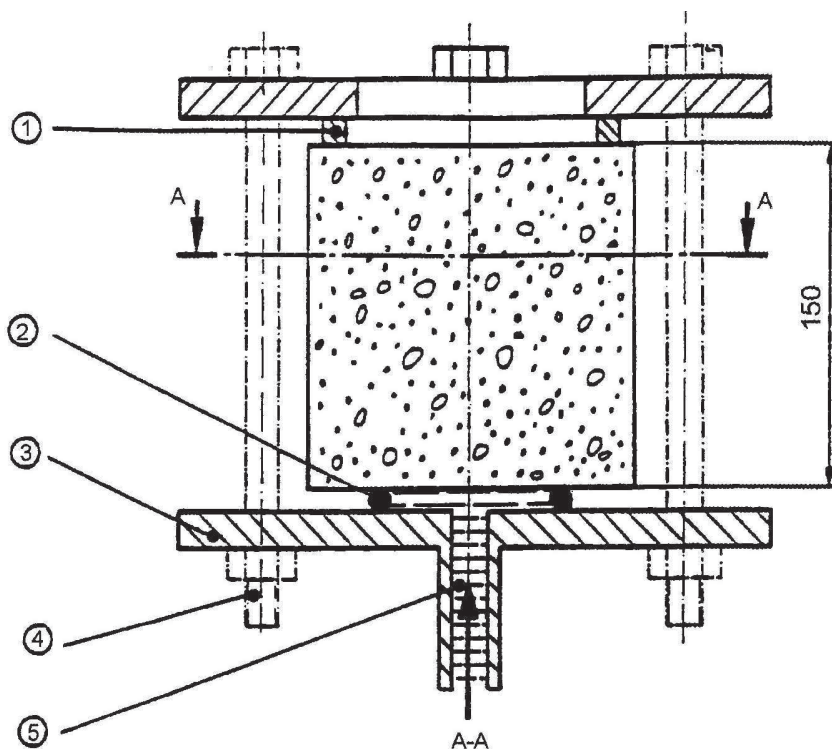
Z hlediska hodnocení stupňů vlivu prostředí se v praxi uplatňuje norma ČSN EN 206-1[2-13]. Betony jsou řazeny podle stupně vlivu prostředí viz. Tab. 3-1. V tabulce jsou navíc ke každé třídě uvedeny doporučené hodnoty maximálního vodního součinitele, minimální pevnostní třídy, minimálního obsahu cementu a vzduchu nebo jiných požadavků. Z tabulky je zřejmé, že trvanlivost betonu se má zvyšovat společně s pevností betonu, obsahem cementu a snižujícím se vodním součinitelem u všech vlivů prostředí. Všiměme si požadavku na 4% provzdušnění u betonu s vlivem působení mrazu a rozmrazování.

Stupně vlivu prostředí																							
	Bez nebezpečí koroze nebo narušení	koroze způsobená karbonatací						koroze způsobená chloridy						působení mrazu a rozmrazování				chemicky agresivní prostředí					
								mořská voda						jiné chloridy než z mořské vody									
		XC1	XC2	XC3	XC4	XS1	XS2	XS3	XD1	XD2	XD3	XF1	XF2	XF3	XF4	XA1	XA2	XA3					
Maximální vodní součinitel	---	0,65	0,60	0,55	0,50	0,50	0,45	0,45	0,55	0,55	0,45	0,55	0,55	0,50	0,45	0,55	0,50	0,45					
Minimální pevnostní třída	C12/15	C20/25	C25/30	C30/37	C30/37	C30/37	C35/45	C35/45	C30/37	C30/37	C35/45	C30/37	C25/30	C30/37	C30/37	C30/37	C30/37	C35/45					
Minimální obsah cementu (kg/m <sup>3</sup> )	---	260	280	280	300	300	320	340	300	300	320	300	300	320	340	300	320	360					
Minimální obsah vzduchu (%)	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	4,0 <sup>a)</sup>	4,0 <sup>a)</sup>	4,0 <sup>a)</sup>	---	---	---					
Jiné požadavky												kamenivo podle prEN 12620:2000 s dostatečnou mrazuvzdorností				síranyzdorný cement <sup>b)</sup>							
<sup>a)</sup> Pokud není beton provzdušněn, mají se vlastnosti betonu zkoušet podle příslušné zkušební metody ve srovnání s betonem, u kterého byla prokázána odolnost proti mrazu a rozmrazování (mrazovým cyklům), pro příslušný stupeň vlivu prostředí.																							
<sup>b)</sup> Pokud množství SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> vyvolává stupeň vlivu prostředí XA2 a XA3, je nezbytné použít síranovzdorný cement. Pokud se cement klasifikuje s ohledem na síranovzdornost, pak mírně nebo vysoce síranovzdorný cement se má použít pro stupeň vlivu prostředí XA2 (a případně i pro stupeň vlivu prostředí XA1), a vysoce síranovzdorný cement se má použít pro stupeň vlivu prostředí XA3.																							

Tab. 3-1 Stupně vlivu prostředí dle ČSN EN 206-1 [2-13]

### 3.1.3 Hloubka průsaku tlakovou vodou

Nejjednodušším způsobem k určení trvanlivosti betonové konstrukce dle normového předpisu, je zkouška hloubky průsaku tlakovou vodou ČSN EN 12390-8 [2-1]. Výstupem této zkoušky je hloubka průniku vody do povrchové vrstvy betonového vzorku. Schopnost betonu odolávat tlakové vodě, čili propustnost betonu je směrodatná pro trvanlivost betonu v konstrukci. Postup zkoušení je popsán v následujícím obrázku (Obr. 3-1) [2-1].



**Obrázek 3-1** Schéma upevnění, zkoušené krychle (1-opěrný kroužek, 2-těsnící kroužek, 3-opěrná deska, 4-upevňovací šroub, 5- tlaková voda) [2-1]

Vzorek betonu, starý minimálně 28 dní, je vyjmut z formy a strana vzorku, na kterou bude působit tlaková voda, je ošetřena drátěným kartáčem (plocha upravená hladítkem je ke zkoušení nevhodná). Poté je vzorek upnut do zařízení, které umožňuje na těleso vyvozovat tlak vody po celou dobu zkoušky. Možná konstrukce zařízení je zobrazena na obrázku výše. Na zkoušenou plochu vzorku má působit tlak vody  $(500 \pm 50)$  kPa po dobu  $(72 \pm 2)$  hodin. V průběhu zkoušky se má kontrolovat průsak vody na površích, které nejsou vystaveny tlaku vody. Případný průsak je nevhodný a měla by být zvážena věrohodnost zkoušky. Závěrem je těleso rozlomeno a povrch osušen suchým hadříkem. Na rozlomeném vzorku je změřena největší hloubka průsaku vody v milimetrech. Tato hodnota, zaokrouhlená na nejbližší milimetr, je uvažována jako výsledek zkoušky [2-1].

#### 3.1.4 Mrazuvzdornost dle ČSN 73 1322

Přestože tato norma [2-2] platí beze změny již od roku 1969 je nejvíce užívaným postupem pro stanovení mrazuvzdornosti na zkušebních tělesech betonových i tělesech z kameniva. Princip metody spočívá ve střídavém zmrazování a rozmrazování vodou nasycených zkušebních těles na počet cyklů daný příslušnými normami, předpisy či projektem. Po předepsaném počtu cyklů se stanoví míra porušení zkušebních těles.

Základní zkouškou pro stanovení míry porušení je pevnost v tahu za ohybu. Počet zkušebních trámců (100 x 100 x 400 mm) se stanoví v závislosti na počtu zmrazovacích cyklů, avšak pro každou zmrazovací etapu je třeba zhotovit jednu sadu trámců zmrazovaných a jednu sadu trámců nezmrazovaných. Každá sada má obsahovat nejméně tři zkušební tělesa. Jeden zmrazovací cyklus sestává ze 4h zmrazování (-15 až -20°C nebo -18 až -23°C) a z 2h rozmrazování ve vodě při teplotě +20°C. Po skončení každé zmrazovací etapy se příslušná sada zkouší na pevnost v tahu za ohybu, samým způsobem se vyzkouší referenční sada. Norma připouští i nedestruktivní zkoušení materiálu, což umožní snížit počet těles.

Jako výsledek zkoušky i výsledek jednotlivých etap se uvádí zjištěný úbytek hmotnosti zkoušených zmrazovaných trámců v % hmotnosti, pevnost betonu v tahu za ohybu, součinitel mrazuvzdornosti betonu (poměr hodnoty aritmetického průměru pevnosti zmrazovaných a referenčních trámců v tahu za ohybu), popř. změna parametru nedestruktivní metody, byla-li použita [2-2].

#### 3.1.5 Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek

Tato norma [2-3] slouží k hodnocení odolnosti povrchové vrstvy cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích prostředků. Norma byla vydána v roce 1984, avšak v roce 2003 byla modifikována změnou Z1. Podstatou zkoušky jsou tři metody.

**Metodou automatického cyklování** je první metodou zkoušení. Povrch betonového vzorku ochladí z kladné teploty (+20°C) na zápornou teplotu (-15°C), na které je předepsanou dobu (15 min) udržován, poté je ohříván na kladnou teplotu, která je rovněž stanovenou dobu udržována- tedy jeden cyklus automatického cyklování. Jednotlivé cykly jsou automaticky řízeny vhodnou chladicí skříní z řídicí jednotkou. Při průběhu zkoušky jsou zkušební tělesa ponořeny do rozmrazovacího prostředku. Je nutné udržet zkušební plochu ponořenou do roztoku po celou dobu. Jako rozmrazovací

### 3 Hodnocení povrchové vrstvy betonu

prostředek se nejčastěji používá 3% roztok NaCl. Po každém 25 cyklu se zkušební tělesa vyjmou a vhodným způsobem se odeberou odpadající části betonu, ty se následně zváží ve vysušeném stavu. Po dosažení hodnoty odpadu  $500 \text{ g.m}^{-2}$  se doporučuje provést síťový rozboru odpadů. Odolnost povrchu cementového betonu je dána následujícím vztahem (3). Vyhodnocení zkoušky se určuje dle následující tabulky (Tab. 3-1).

$$\rho_a = \frac{\sum m}{A} \quad (3)$$

$\Sigma m$  je součet všech hmotností odpadů od prvního do  $n$ - tého cyklu v [g]

$A$  velikost zkušební povrchu v [m]

**Tab. 3-2** Tabulka stupně porušení při daném odpadu [2-3]

Stupeň porušení	$\rho_a [\text{g.m}^{-2}]$	Charakter odpadu
1- nenarušený	do 50	velmi jemné prachovité částice do 1mm
2- slabě narušený	do 500	jako u stupně 1, větší množství částic do 1mm, podíl částic do 2mm menší než 50% hmotnosti odpadu
3- narušený	do 1000	jako u stupně 2, podíl částic nad 2mm přes $500 \text{ g.m}^{-2}$
4- silně narušený	do 3000	jako u stupně 2, podíl částic nad 2mm přes $500 \text{ g.m}^{-2}$
5- rozpadlý	přes 3000	jako u stupně 4, podíl částic nad 4 mm více jak 20% hmotnosti odpadu

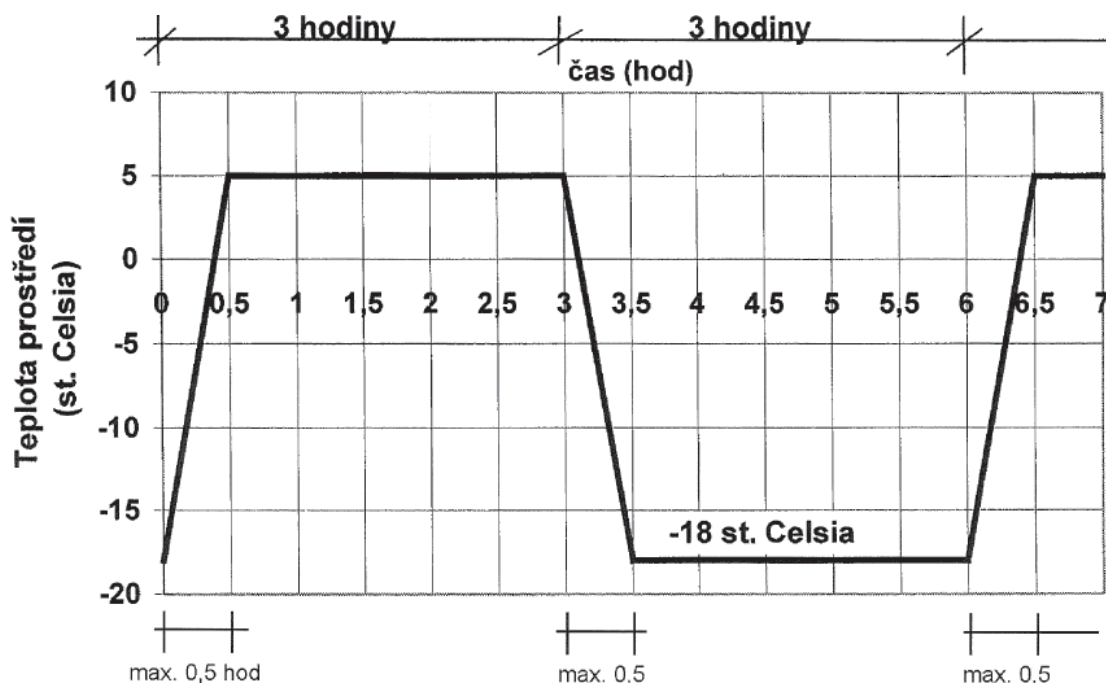
Př.: 450,2–100 znamená, že odpadu  $450,2 \text{ g.m}^{-2}$  bylo dosaženo po 100 cyklech.

**Ruční manipulace se vzorky**, je název druhé metody. Podstatou zkoušky jsou zkušební tělesa, na které je připevněna objímka na horní plochu tělesa. Pomocí objímky je vytvořený zvýšený okraj, do kterého se naleje voda do výšky 2 mm. Při rozmrazování vodou se tělesa zmrazují po dobu 16h při teplotě  $(-8 \pm 1)^\circ\text{C}$ . Pak se vytvořený led po dobu 1,5h rozmrazuje pod tekoucí vodou teploty  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ . Při druhém a dalším pokusu se postup opakuje s tím rozdílem, že těleso musí být zmrazováno nejméně 5h. Při rozmrazování chemickými prostředky se tělesa zmrazují stejným způsobem, jen místo vody je použita rozmrazovací látka. Nejčastěji se používá NaCl v množství  $270 \text{ g.m}^{-2}$ . Rozmrazování trvá 1h, poté se tělesa omývají vodou po dobu 0,5h, aby se zbavily rozmrazovací látky. Každý další cyklus se skládá z 5h zmrazování, 1h rozmrazování a 0,5h oplachování. Během zkoušky se sleduje povrch tělesa a hodnotí se slovně. Zkouška je ukončena a vyhodnocena po předepsaném počtu cyklů nebo při poškozeném povrchu (viz. d ).



- a) nenarušený
- b) malé povrchové odlupování
- c) vylupování zrn drobného kameniva
- d) poškozený povrch

**Metoda automatického cyklování II** byla do normy přidána změnou Z1 v roce 2003. Stejně jako v předchozí metodě, je na vzorku přiloženou objímkou vytvořen zvýšený okraj. Do takto vytvořeného prostoru se naleje vrstva 3% roztoku NaCl (nejméně 5mm), zkoušená plocha by měla být předem nasáknutá vodou (alespoň dva dny). Takto připravené vzorky jsou vloženy do chladicí skříně, kde jsou vystaveny cirkulujícímu vzduchu s teplotou, mění se dle následujícího grafu (Graf 3-1) (3 hodiny  $(-18 \pm 1)^\circ\text{C}$ , 3 hodiny  $(5 \pm 1)^\circ\text{C}$ ).

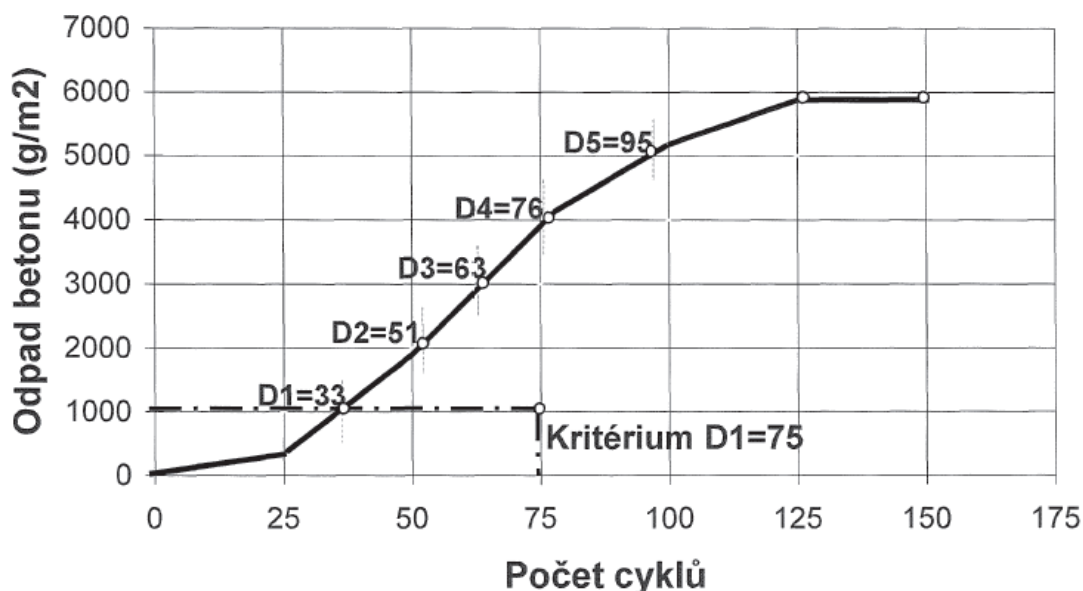


**Graf 3-1** Cyklus chlazení zkušeneho vzorku [2-3]

Po určitém počtu cyklů začne docházet ke zjevnému poškození zkoušené plochy vzorku, nejdéle však po 28 cyklech, se musí těleso vyjmout, roztok z těles splatit do přichystané misky a zvážit vysušené odpady. Poté se těleso omyje, znovu se naleje roztok do objímky a postup se opakuje.

Vyhodnocení zkoušky se provede podle součinitelů odolnosti D1 až D5, tyto součinitelé se získávají z grafu (Graf. 3-2) stanovením průsečíku čáry odpadů betonu s příslušnou souřadnicí odpadu betonu. Jako kritérium odolnosti betonu proti působení vody a roztoku se obvykle uvádí součinitel odolnosti D1 [2-3].

- D1 – počet cyklů, po kterých je odpad betonu  $1000 \text{ g.m}^{-2}$
- D2 – počet cyklů, po kterých je odpad betonu  $2000 \text{ g.m}^{-2}$
- D3 – počet cyklů, po kterých je odpad betonu  $3000 \text{ g.m}^{-2}$
- D4 – počet cyklů, po kterých je odpad betonu  $4000 \text{ g.m}^{-2}$
- D5 – počet cyklů, po kterých je odpad betonu  $5000 \text{ g.m}^{-2}$



**Graf 3-2** Vyhodnocení zkoušky v závislosti na odpadu betonu a počtu cyklů [2-3]

#### 3.1.6 Odolnost proti zmrazování a rozmrazování- Odlupování

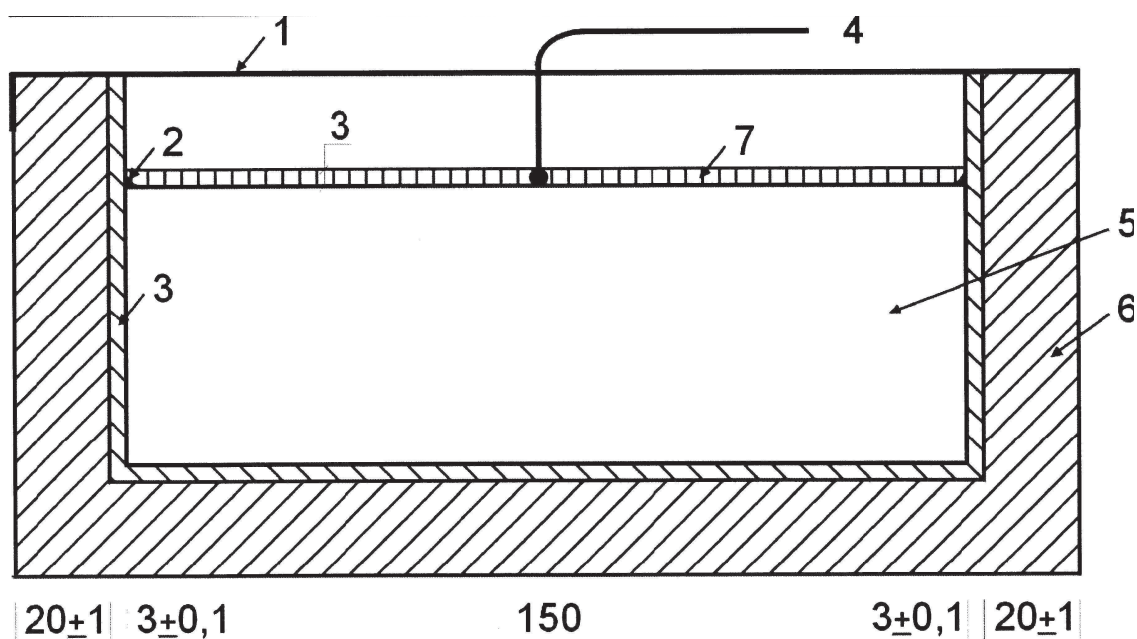
Nejnovější vydaná norma pro zkoušení odolnosti zmrazování a rozmrazování (avšak jen pro povrchové zvětrávání – odlupování) je norma ČSN P CEN/TS 12390-9 [2-4], která byla vydána v roce 2007. Souběžně s touto normou byla vydána norma ČSN 73 1380 [2-5], podle které se stanovuje odolnost vzorku při zmrazování a rozmrazování, avšak v důsledku porušení vnitřní struktury. O této normě [2-5] bude pojednáváno v další podkapitole.

Podstatou zkoušení jsou tři různé zkušební metody. Zkouška na desce, která je referenční metodou a dále bude blíže popsána. První alternativní metodou je zkouška na krychli, při které se vzorky betonu (krychle) vystavují cyklům zmrazování a rozmrazování (56 cyklům), přičemž jsou celým objemem ponořeny do deionizované vody nebo 3% roztoku NaCl. Druhou alternativní metodou je zkouška CF/CDF. Zkušebními tělesy jsou tělesa, která vzniknou rozdělením formy krychle středovou deskou. Poté se tělesa podrobí zkoušce zmrazování a rozmrazování v deionizované vodě

### 3 Hodnocení povrchové vrstvy betonu

(zkouška CF- vyhodnotí se hmotnost odloupnutého materiálu po 28 cyklech) nebo v 3% roztoku NaCl (zkouška CDF- vyhodnotí se hmotnost odloupnutého materiálu po 56 cyklech). Na tyto alternativní metody bude v tomto textu odkázáno pouze předešlou zmínkou.

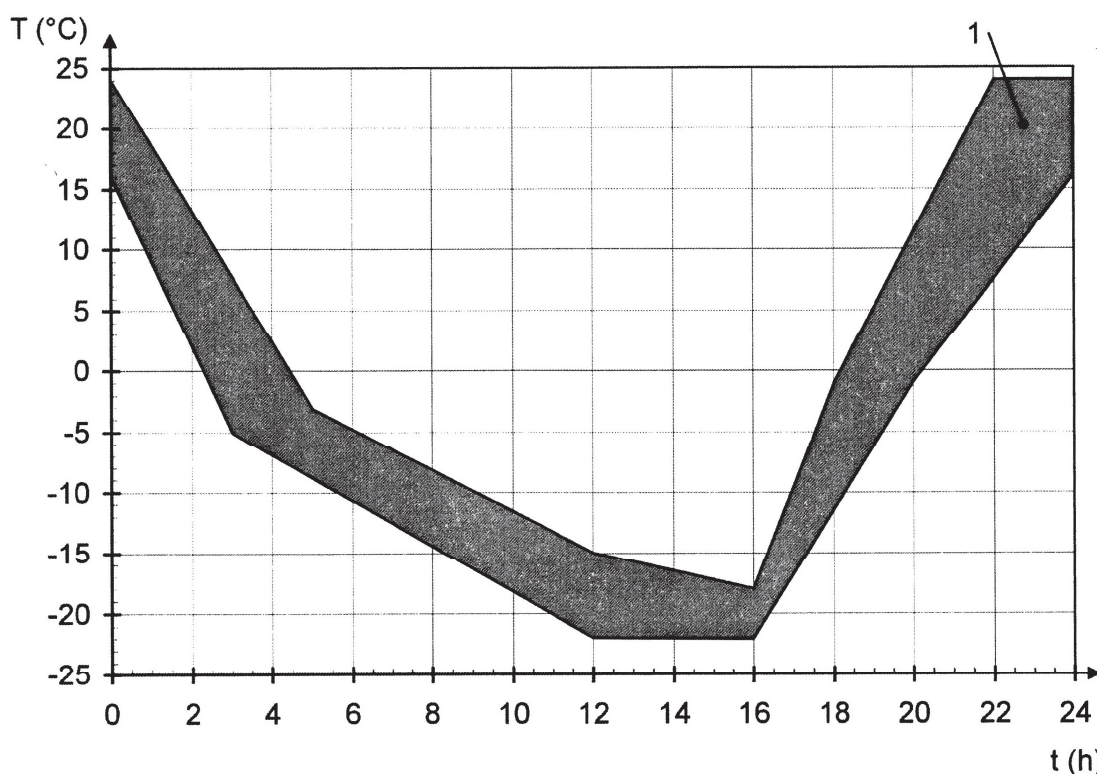
Jak již bylo řečeno, referenční metodou této normy je zkouška na desce. Je zapotřebí čtyř desek, které se vyříznou z čtyřech různých krychlí. Zkušební krychle se první den po odlití chrání polyethylenovou folií proti vysoušení při laboratorních podmínkách. Dalších 7 dní se tělesa uchovávají ve vodní lázni, poté se tělesa vyjmou a umístí se do klimatizované skříně, kde setrvávají až do samotného zahájení zkoušky. Po 21 dní se však z krychlí mají vyříznout zkušební desky ( $50 \pm 2$ ) mm tlusté tak, že zkušební povrch je umístěn uprostřed krychle. Při staří betonu 28 dnů se na povrch zkoušeného betonu (na vzorek se předem přilepí okraj ze silikonové pryže) naleje vrstva deionizované vody v tloušťce asi 3 mm. Povrch se nechá nasakovat vodou dalších ( $72 \pm 2$ ) hodin. Podle (Obr. 3-2) se tepelně zaizolují nezkoušené vrstvy vzorku.



**Obrázek 3-2** Schéma zateplení zkoušeného vzorku [2-4]

Před zahájením zkoušky se deionizovaná voda nahradí zmrazovacím roztokem. Takto připravené vzorky se umístí do zmrazovací komory a jsou vystavovány jednotlivým cyklům zmrazování a rozmrazování podle (Graf 3-3).





**Graf 3-3** Zmrazovací a rozmrazovací cyklus zkoušeného vzorku [2-4]

Po  $(7 \pm 1)$ ,  $(14 \pm 1)$ ,  $(28 \pm 1)$ ,  $42 \pm 1$  a 56 cyklu se shromáždí odloupnutý materiál, povrch se opláchne a nalije se na něj čerstvý zmrazovací roztok. Zkouška se vyhodnotí na základě hmotnosti vysušeného odloupnutého materiálu pro každou krychli a po každém  $n$ -tém měření dle vztahu (4) [2-4]:

$$S_n = \frac{m_{s,n}}{A} \times 10^3 \quad (4)$$

$S_n$  hmotnost odloupnutého materiálu ze zkoušeného povrchu  $[\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}]$

$m_{s,n}$  množství odloupnutého materiálu po  $n$  zmrazovacích cyklech  $[\text{g}]$

$A$  plocha zkoušeného povrchu zaokrouhlená na  $100 \text{ mm}^2$

### 3.1.7 Zkoušení odolnosti betonu proti zmrazování a rozmrazování - Porušení vnitřních struktur

Tato norma [2-5], jako jediná, se zabývá porušením zkoušeného betonu nejen při povrchové vrstvě, ale i porušením jeho vnitřní struktury. Podstata zkoušky spočívá ve stanovení jednotlivých dynamických modulů pružnosti.

Tato norma zahrnuje tři postupy, z nichž ani jeden není označen jako referenční. Jedna se o zkoušku na trámci, desce a zkoušku CIF. Zkouška na desce a zkouška CIF se jeví jako relativně složité a navíc nejsou příliš citlivé. Naopak zkouška na trámci se jeví jako jednoduchá. Důraz je kladen na nedestruktivní zkoušení betonu pomocí ultrazvukové a rezonanční metody. Novou veličinou, kterou se posuzuje míra porušení vnitřní struktury betonu je relativní dynamický modul (RDM), které se stanoví dle vztahů (5) nebo (6).

$$RDM(f) = \left( \frac{f_n}{f_0} \right)^2 100 [\%] \quad (5)$$

$RDM(f)$       *relativní dynamický modul, stanovený podle rezonanční frekvence*

$f_n$       *vlastní frekvence měřená po n zmrazovacích cyklech [Hz]*

$f_0$       *počáteční vlastní frekvence [Hz]*

nebo

$$RDM(U) = \left( \frac{t_{s,0}}{t_{s,n}} \right)^2 100 [\%] \quad (6)$$

$RDM(U)$       *relativní dynamický modul, stanovený podle doby průchodu UZ impulsů*

$t_{s,0}$       *počáteční doba průchodu UZ impulsů zkušebním tělesem [ $\mu$ s]*

$t_{s,n}$       *doba průchodu UZ impulsů zkušebním tělesem po n cyklech [ $\mu$ s]*

Zkouška zmrazování a rozmrazování začíná po 28 dnech od zhotovení zkušebních těles. Na každém tělese se odečte počáteční hodnota měření pomocí zkušební metody rezonanční a současně ultrazvukové a data se zaznamenají. Zmrazovací fáze každého cyklu trvá 8 h, nejpozději do 15 min po jejím ukončení následuje čtyřhodinová rozmrazovací fáze, v níže jsou trávce polévány vodou o teplotě  $(13 \pm 8)^\circ\text{C}$  nebo jsou vloženy do lázně stejné teploty. Délka zmrazovací a rozmrazovací fáze je tedy zásadně odlišná od dosavadních zvyklostí, neboť prodlužuje čas potřebný k provedení zkoušky, jeden cyklus trvá celých 12 h.

Po každém měření po n zmrazovacích a rozmrazovacích cyklech se pro každé zkušební těleso stanovuje RDM dle použité metody, průměrná hodnota a směrodatná odchylka z každého zkušebního tělesa a tyto data se poté použijí k vyhodnocení porušení vnitřní struktury. Jako informativní hodnota se používá absorpce vody, což je změna hmotnosti po n zmrazovacích a rozmrazovacích cyklech [2-5].

### 3.2 Hodnocení povrchové vrstvy betonu NDT metodami

V současné době se objevila velká snaha o vývoj nedestruktivních metod (NDT), podle kterých by se mohla stanovit aktuální trvanlivost povrchové vrstvy betonu. Podle trvanlivosti povrchové vrstvy lze z jistým přiblížením usuzovat trvanlivost celé konstrukce. Jak vyplývá z předchozí kapitoly, standardizované zkoušky na hodnocení trvanlivosti betonu jsou bez ohledu na přesnost velmi časově a tudíž i finančně náročné. NDT metody, založené na principu přepočítávání naměřené propustnosti povrchové vrstvy betonu na její trvanlivost, otevírají cestu k neúměrně rychlejšímu a snadnějšímu odhadu trvanlivosti povrchové vrstvy betonu, potažmo celé konstrukce [3-1].

#### 3.2.1 Metoda Germanns Water Permeability Test

Pro stanovení vodní propustnosti lze využít přístroj Germanns Water Permeability Test (GWT). Princip měření spočívá ve stanovení průtoku tlakové vody (tlak 0,2 bar) strukturou betonového povrchu v čase dle vztahu (7). Viz. Obr. 3-6.

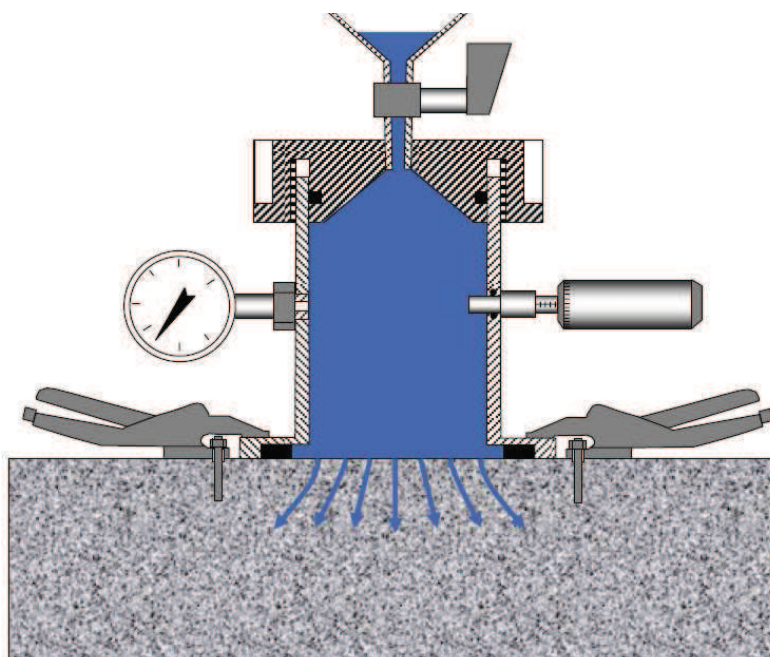
$$Q = \frac{B \cdot (g_1 - g_2)}{A \cdot t} [\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (7)$$

$B$  plocha kolíku ( $B = 78,6 \text{ mm}^2$ )

$g_1$  a  $g_2$  čtení před a testu

$A$  smáčený povrch betonu ( $A = 3018 \text{ mm}^2$ )

$t$  čas měření [s]



Obrázek 3-3 Měření vodní propustnosti přístrojem GWT [4-3]

Součinitel propustnosti betonu  $k_{LD}$  se vypočítá podle Darcyho zákona a objemu zatvrdlého cementového tmele k celkovému objemu betonu, viz. vztah (8).

$$k_{LD} = \frac{Q}{b \cdot \frac{p}{L}} [mm \cdot s^{-1}] \quad (8)$$

$Q$  průtok vody [ $mm \cdot s^{-1}$ ]

$b$  obsah cementové tmele (25-40 %)

$p$  tlak vody (0,2 bar)

$L$  tloušťka těsnění (15 mm)

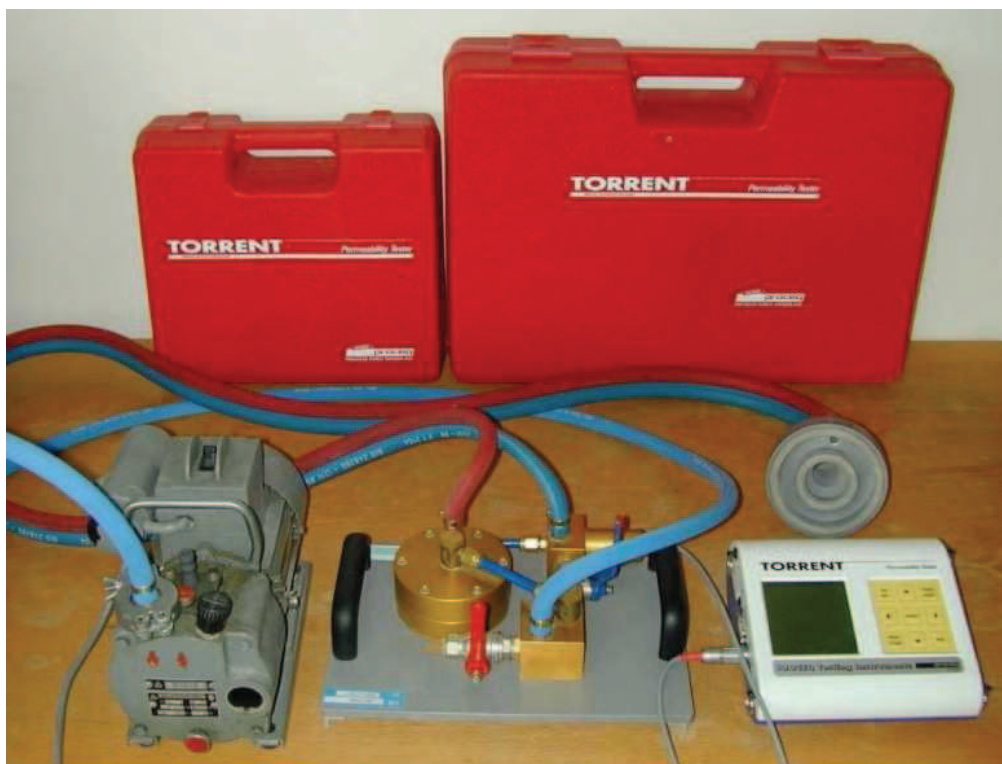
Výsledný součinitel vnitřní propustnosti  $k_I [m^2]$  se vypočítá podle vztahu (9).

$$k_I = 1,02 \cdot 10^{-7} \cdot k_{LD} [m^2] \quad (9)$$

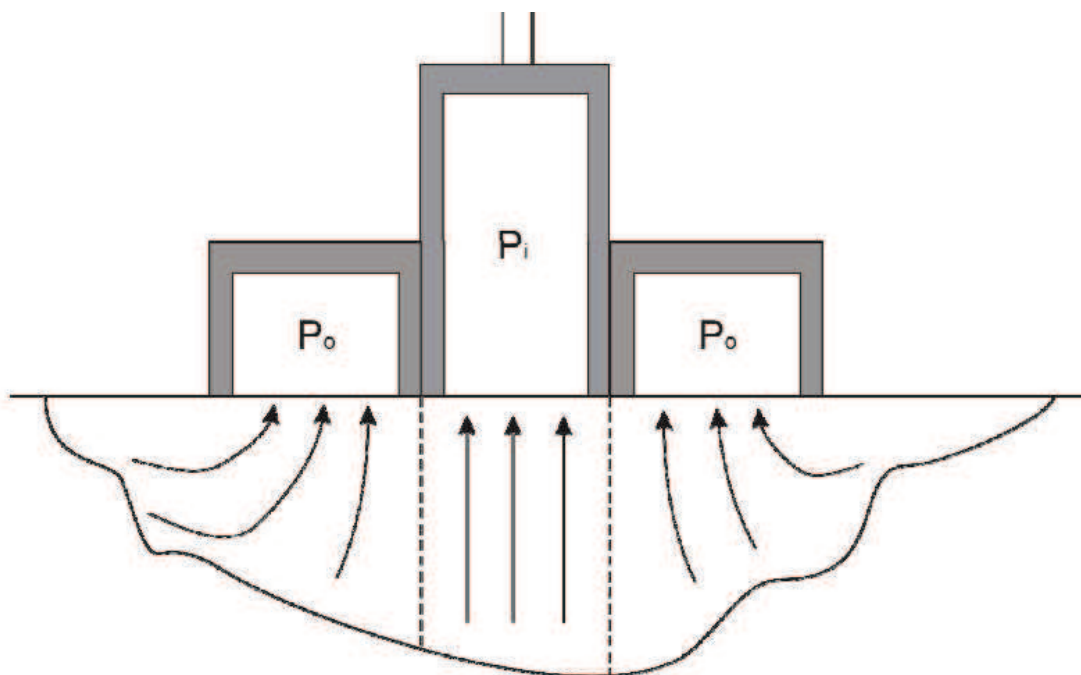
Takto stanovená hodnota součinitele vnitřní propustnosti povrchové vrstvy je považována jako základní kritérium k posouzení trvanlivosti betonu. V mnoha evropských normách lze nalézt hodnota součinitele jako prahová hodnota pro kritérium trvanlivého či běžného betonu [3-1]. V manuálu přístroje je uvedeno, že beton můžeme považovat za trvanlivý, jeli hodnota  $Q < 0,66 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ .

#### 3.2.2 Metoda Torrent Permeability Tester

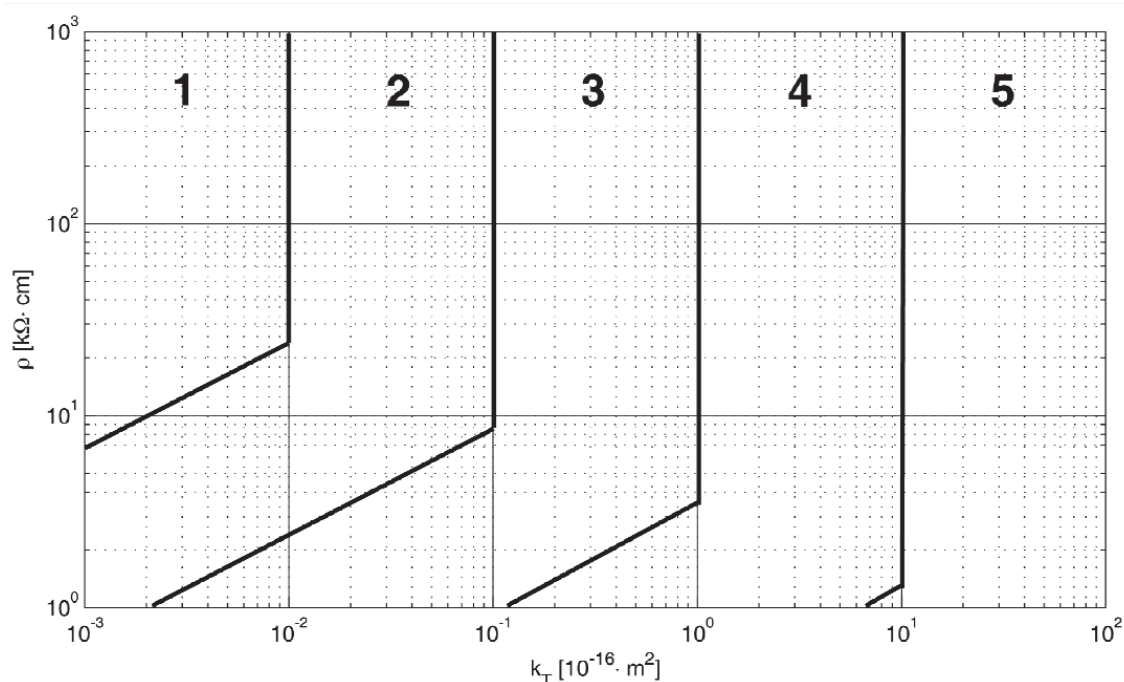
Metoda využívá výrobek švýcarské firmy Proceq- Torrent Permeability tester (TPT). Pomocí zařízení se zjišťuje součinitel vzduchové propustnosti betonové vrstvy. Přístroj změří a vyhodnotí součinitel propustnosti  $k_T$ , hloubku vniknutí vakua a tlak. Zařízení se skládá z vakuové pumpy, dvoukomorové buňky, regulátoru tlaku a ovládací jednotky s digitálním displejem (Obr. 3-3). Zařízení pracuje na principu vytvoření vakua 1000 mbar vakuovou pumpou, po dosažení této hodnoty se zařízení vypne a sleduje se proud vzduchu procházející betonem do vnitřní komory (Obr. 3-4). Doba měření je 12 min. Výrobce dodává tabulku (Tab. 3-2) a nomogram (Graf 3-4), podle kterých lze stanovit kvalitu povrchové vrstvy betonu, a tím i nepřímo hodnotit trvanlivost [3-1]. Metoda v ČR není normalizovaná, je však specifikována švýcarskou normou SN 505 262/1.



Obrázek 3-4 Souprava TPT [3-3]



Obrázek 3-5 Měření vzdušné propustnosti přístrojem TPT [3-3]



**Graf 3-4** Nomogram, sloužící jako pomůcka v vyhodnocení kvality krycí vrstvy [3-3]

**Tab. 3-3** Vyhodnocení kvality krycí vrstvy

Kvalita krycí vrstvy	Index	$k_T$ [ $\times 10^{-16} \text{ m}^2$ ]
Velmi špatná	5	$> 10$
Špatná	4	1,0-10
Střední	3	0,1-1,0
Dobrá	2	0,01-0,1
Velmi dobrá	1	$< 0,01$

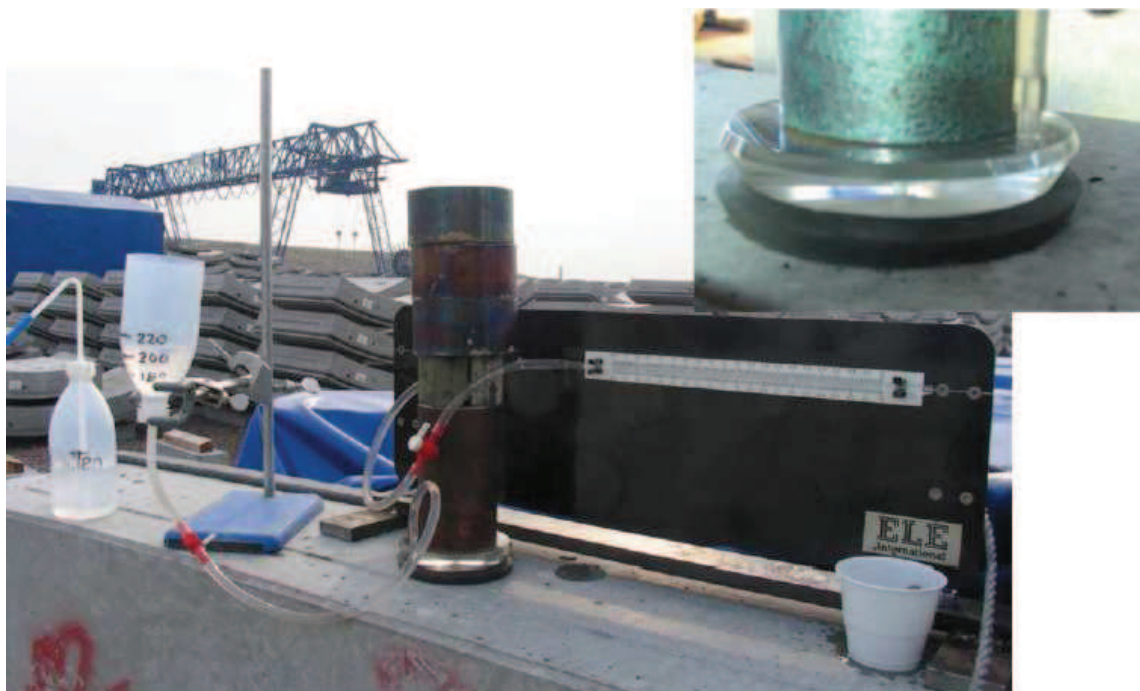
### 3.2.3 Metoda Initial Surface Absorption Test

Další metodou k posouzení povrchové propustnosti je metoda Initial Surface Absorption Test (ISAT). Metoda byla vyvinuta v Itálii a je specifikována britskou normou BS 1881 část 5. Tato metoda je založena, rovněž jako při metodě GWT, na měření množství tlakové vody vtékající do vzorku přes povrchovou plochu. Množství protečené vody se získá měřením doby pohybu vody kapilárním systémem známého objemu, přičemž voda protéká přes povrchovou plochu vzorku, která je definována plochou akrylátové komůrky pevně upevněné k povrchu vzorku. Tato průhledná komůrka je propojena s přívodním otvorem a odvodní otvor komůrky je spojen se skleněnou kapilárou s měřítkem. Pro vytvoření tlaku 0,02 bar je kapilára s měřítkem i nálevka s vodou umístěna 200 mm nad komůrkou viz. Obr. 3-6.



### 3 Hodnocení povrchové vrstvy betonu

Měření pohybu nastává po vyplnění komůrky vodou, přičemž přívod vody je zastaven. Čtení soubory dat je odečítáno po 10, 30 a 60 min od okamžiku prvního smočení povrchu. Předběžná třída kvality povrchu betonu a perioda, po které se budou data odečítat ( 30s, 1 nebo 2 min), se určí podle počtu jednotek na měřítku po prvních 5 s měření. Výpočet počáteční povrchové absorpce je proveden dle vztahu (10).



**Obrázek 3-6** Příklad využití přístroje ISAT in-situ [1-3]

$$ISA = \frac{0,6 \cdot D}{t} \text{ [ml/m}^2\text{/s]} \quad (10)$$

$D$  počet dílků na stupnici měřicího přístroje

$t$  čas [s]

Klasifikace povrchu betonu je následně provedena dle Tab. 3-3 [3-1].

**Tab. 3-4** Vyhodnocení zkoušky ISAT [3-1]

Absorbce betonu	Výsledky zkoušky ISAT [ml/m <sup>2</sup> /s]			
	Čas od začátku testu			
	10 min	30 min	60 min	120 min
Vysoká	> 0,50	> 0,35	> 0,20	> 0,15
Střední	0,25 až 0,50	0,17 až 0,35	0,10 až 0,20	0,07 až 0,15
Nízká	< 0,25	< 0,17	< 0,10	< 0,07

### 3.3 Vliv vlhkosti betonu

Jak již bylo zmíněno v kapitole 2.2.2 závisí propustnost betonu na aktuální vlhkosti zkoušeného vzorku. Proto je nutné před každým měřením propustnosti provést měření aktuální vlhkosti zkoušeného vzorku, např. použitím přístroje Kakaso (Obr. 3-7). Přístroj naměří bezrozměrnou číselnou hodnotu, která se pomocí kalibrační křivky dodané výrobcem či uživatelem přepočte na aktuální povrchovou hmotnostní vlhkost. Srovnávací hodnota hmotností vlhkosti byla stanovena jako hodnota 3%. Velmi užitečnou pomůckou může být metodika „Standardní operační postup pro přepočet hodnoty součinitele vzduchové propustnosti vzhledem k aktuální vlhkosti“ [3-3]. Výsledkem tohoto postupu je kalibrační vztah (11), s jehož použitím lze naměřenou hodnotu součinitele vzduchové propustnosti  $k_T$  za aktuální povrchové vlhkosti přepočítat na srovnávací 3% vlhkost. Výsledky zkoušek při různých povrchových vlhkostech lze tedy přepočtem porovnávat.

$$k_{T,3} = k_{T,w} \cdot e^{\alpha(3-w)} [m^2] \quad (11)$$

$k_{T,w}$  hodnota koeficientu vzduchové propustnosti

$w$  aktuální vlhkost

$\alpha$  opravný vlhkostní součinitel (doporučuje se  $\alpha = -0,862$ )

Pro přepočet hodnot z přístroje Kakaso se doporučuje použít kalibrační vztah (12) [3-1].

$$w = \frac{p_1 k_s + p_2}{k_s + q_1} [\%] \quad (12)$$

$w$  hmotnostní vlhkost

$k_s$  průměrná hodnota zjištěná přístrojem Kakaso

$p_1$  koeficient (pokud není k dispozici kalibrační vztah pro daný typ betonu, lze užít hodnotu 6,518)

$p_2$  koeficient (DTTO -86,63)

$q_1$  koeficient (DTTO 4,954)





**Obrázek 3-7** *Přístroj KAKASO [3-1]*

### 3.4 Porozimetrie betonu

Porozimetrie betonu hraje klíčovou roli v odolnosti betonu proti působení mrazu a rozmrazovacích cyklů. Může hrát významnou roli i při působení proti mrazu a chemickým rozmrazovacím látkám (viz. experimentální část). Pro lepší porozumění těchto souvislostí je třeba zkoumat pórovou strukturu z bližšího hlediska než pouze výjádřením pórovitosti betonu v procentech.

Porozimetrie betonu může být zkoumána pomocí rtuťového porozimetru. Rtuťový porozimetr pracuje na principu vtlačování kapalného nesmáčivého média (rtuti) do zkoumaného vzorku. Zjednodušeně lze říci, že rtuť vniká do póru určitého průměru při odpovídajícím tlaku viz. Obrázek 3-8. Tuto závislost vyjadřuje vztah (13).

$$\Delta P = \frac{-2 \cdot \sigma_{Hg} \cdot \cos \theta}{r} \quad (13)$$

$\Delta P$  tlak pod kterým rtuť vniká do póru [ $N \cdot m^{-2}$ ]

$\sigma_{Hg}$  povrchové napětí rtuti [ $N \cdot m^{-1}$ ]

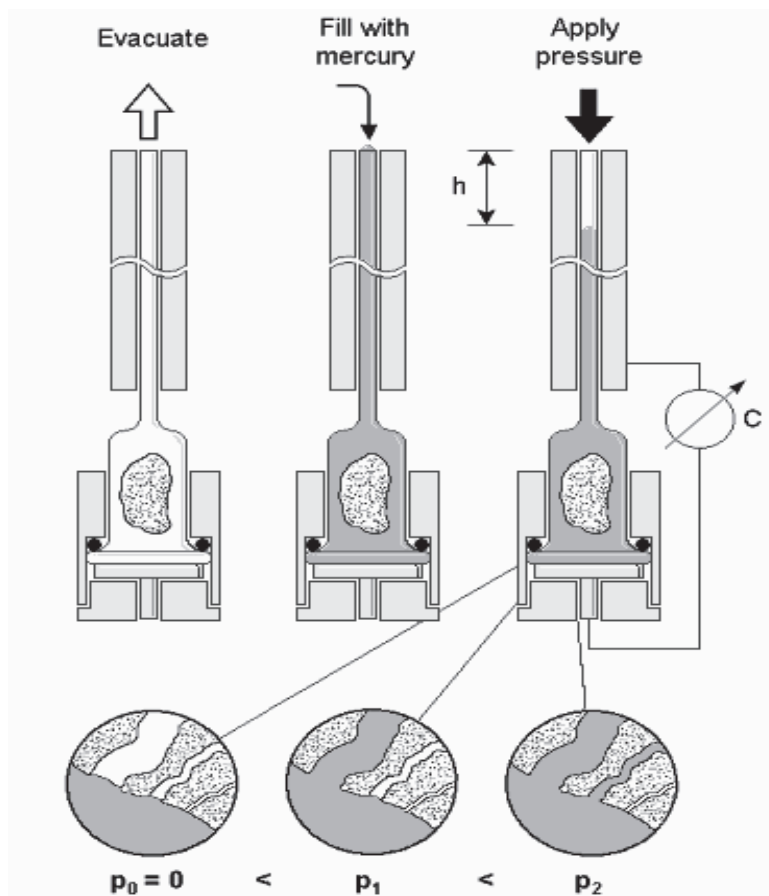
$\theta$  úhel smáčení stěn pórů rtutí

$r$  poloměr pórů [ $m$ ]

### 3 Hodnocení povrchové vrstvy betonu

Při správném výchozím nastavení přístroje, zejména úhlu smáčení stěn, se jedná o velmi přesnou metodu. Problém spočívá v relativně malé velikosti zkušební vzorku 3-5 cm<sup>3</sup>. Je zřejmé, že vzorek o takové velikosti nedokáže optimálně vystihnout heterogenitu betonu. Spolehlivější data by byla zajištěna větší velikostí vzorku a provedením více měření. Na základě změny tlaku a sledování vtlačeného objemu rtuti do vzorku, můžeme pomocí přístroje stanovit následující výstupy.

- celková porozita [cm<sup>3</sup>/g]
- celkový povrch pórů [m<sup>2</sup>/g]
- objemová hmotnost [g/cm<sup>3</sup>]
- zjevná hustota matrice [g/cm<sup>3</sup>]
- střední velikost pórů [m]



Obrázek 3-8 Schéma principu rtuťového porozimetru

## 4 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

V experimentální části této práce je porovnávána mrazuvzdornost na zkušebních betonových tělesech, stanovená dle ČSN 73 1322- *Mrazuvzdornost* [2-2] a odolnost betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek dle ČSN 73 1326. *Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek* [2-3], s výsledky propustnosti získanými pomocí přístrojů TPT, GWT a ISAT. Navíc bude porovnána výsledná pevnost betonu v tlaku s teoretickou pevností, získanou odhadem na základě výsledků z porozimetrie.

### 4.1 Výroba betonu

Pro účely experimentu byly navrženy tři receptury betonu. Vzorky tedy byly zkoušeny a betonovány ve třech sadách. Receptury jsou navrženy tak, aby pevnost betonu dosahovala pro každou recepturu jiné hodnoty. Zvyšování pevnosti betonu pro jednotlivé receptury je docíleno zejména vyšším dávkováním cementu, za účelem navyšovat i trvanlivost pro jednotlivé receptury.

Beton byl namíchán a zkušební tělesa poté vybetonována v prostorách betonárky TBG Betonmix a.s. Čerstvý beton byl pomocí automobilového domíchávače přepraven do blízkosti laboratoří betonárky, kde byl přemístěn do nádob, ze kterých bylo možné zkušební tělesa betonovat Obr. 4-1 a 4-2. Na stejném místě byly ihned zjišťovány vlastnosti čerstvého betonu.

Po 24h byla tělesa odformována a převezena do laboratoří Ústavu stavebního zkušebnictví v Brně. Zde byla tělesa uložena do vlhkého prostředí a byla udržována teplota 20°C tak, aby byly zajištěny vhodné podmínky pro tvrdnutí betonu. Poté zde byla prováděna veškerá další měření.

#### Receptura 1

Bratčice 0/4	976 kg.m <sup>-3</sup>
Olbramovice 4/8	182 kg.m <sup>-3</sup>
Olbramovice 8/16	690 kg.m <sup>-3</sup>
Voda	200 kg.m <sup>-3</sup>
Cement 42,5R	255 kg.m <sup>-3</sup>

### Receptura 2

Bratčice 0/4	929 kg.m <sup>-3</sup>
Olbramovice 4/8	182 kg.m <sup>-3</sup>
Olbramovice 8/16	690 kg.m <sup>-3</sup>
Voda	200 kg.m <sup>-3</sup>
Cement 42,5R	305 kg.m <sup>-3</sup>

### Receptura 3

Bratčice 0/4	886 kg.m <sup>-3</sup>
Olbramovice 4/8	182 kg.m <sup>-3</sup>
Olbramovice 8/16	690 kg.m <sup>-3</sup>
Voda	209 kg.m <sup>-3</sup>
Cement 42,5R	355 kg.m <sup>-3</sup>



**Obrázek 4-1** *Přeprava betonu pro betonáž zkušebních těles*





**Obrázek 4-2** *Betonáž zkušebních těles*

## 4.2 Zkoušení betonu

Okamžitě po umíchání betonu byly zjišťovány vlastnosti čerstvého betonu, tj. zkouška sednutím podle ČSN EN 12350-2 [2-6] (Obr. 4-3), zkouška rozlitím podle ČSN EN 12350-5 [2-7], stanovení objemové hmotnosti podle ČSN EN 12350-6 [2-8] a stanovení obsahu vzduchu podle ČSN EN 12350-7 [2-9]. Jako doplňující zkouška čerstvého betonu bylo provedeno vyhodnocení spacing faktoru přístrojem AirVoid Analyser (Obr. 4-4). Spacing faktor je průměrná maximální vzdálenost z jakéhokoliv místa v betonové pastě k rozhraní vzduchového póru. Je známo, že 4-6% provzdušnění betonu a spacing faktor menší než 0,2 mm by měl zajistit dobrou odolnost proti zmrazování a rozmrazování [3-4]. Přístroj pracuje na principu vážení vzduchových bublin, které postupně unikají z pod vodou míchaného čerstvého betonu. Bubliny se postupně shromažďují pod ponořenou pokličkou, přičemž přístroj zaznamenává historii příbytku bublin včetně změny váhy zavěšené pokličky v čase.

Pevnost v tlaku dle [2-10] byla stanovena pro každou recepturu ze třech zkušebních vzorků krychle o hraně délky 150 mm. Objemová hmotnost zkušebních těles byla stanovena podle [2-12]. Mrazuvzdornost byla zjišťována na trámci 100x100x400

mm. Pro zkoušení mrazuvzdornosti byly přichystány dvě sady trámců. Jedna sada zmrazovaná (6 zkušebních těles) a druhá referenční (3 zkušební tělesa), tak aby mohla být zjištěna pevnost v tahu za ohybu minimálně na třech zkušebních tělesech. Odolnost proti působení vody a chemických rozmrazovacím látkám byla stanovena na třech krychlích o hraně délky 150 mm. Jako rozmrazovací prostředek byl použit 3% roztok NaCl. Zkoušky propustnosti přístroji TPT (Obr. 4-5), GWT (4-6) a ISAT byly provedeny na kvádrech 300x300x150 mm. Pro každou recepturu byla vybetonována tři zkušební tělesa. Na každém tělese byly prováděny všechny tři zkoušky propustnosti ve třech měřeních, a to tak, aby TPT byl proveden v pořadí jako první.

Pórovitost (Obr.4-7) byla stanovena na rtuťovém porozimetru Micromeritics Pore Sizer 9310 na Ústavu chemie FAST VUT. Přístroj umožňuje stanovení pórů v intervalu 300-0,006  $\mu\text{m}$  na základě prostupu vtlačované rtuti do zkoumaného vzorku, respektive do jeho pórového systému.

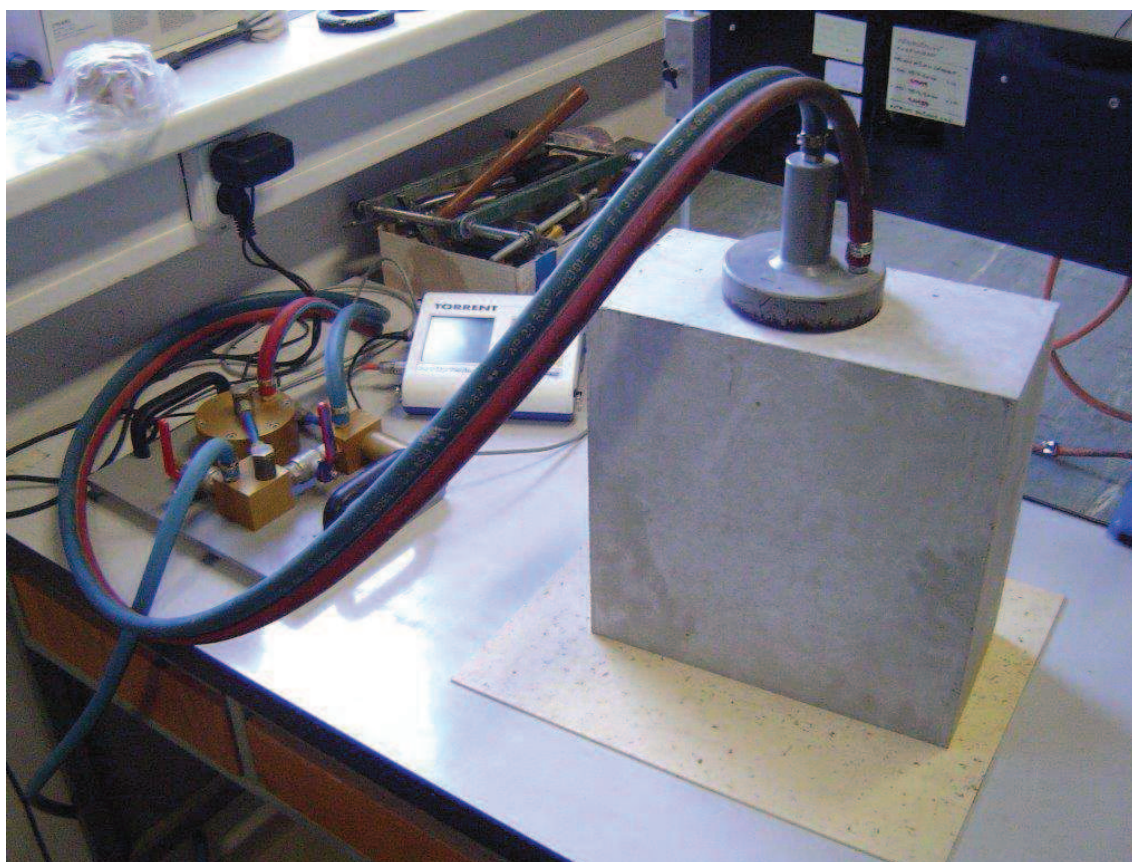


**Obrázek 4-3** *Zkouška sednutím*





Obrázek 4-4 Zkouška přístrojem AirVoid Analyser

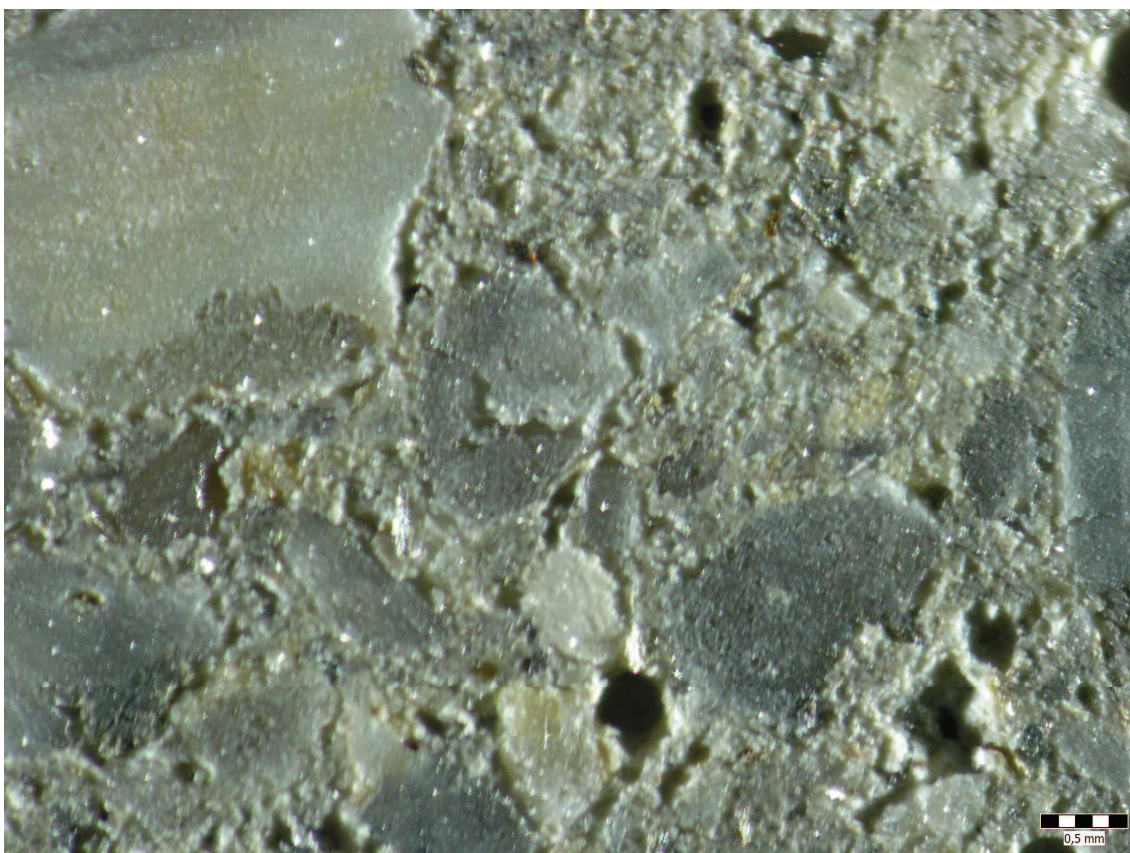


Obrázek 4-5 Zkouška přístrojem Torrent Permeability Tester





Obrázek 4-6 Zkouška přístrojem *German's Water Permeability Test*



Obrázek 4-7 Stínovaná fotografie pórové struktury vzorku betonu receptury 3



## 5 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

### 5.1 Vlastnosti čerstvého betonu

V Tab. 5-1 jsou zobrazeny výsledky jednotlivých vlastností čerstvého betonu. Je zajímavé porovnat obsah vzduchu uvedený v Tab. 5-2, tabulka s výsledky naměřenými na přístroji AirVoid Analyser. Obsah vzduchu stanovený podle ČSN EN 12350-7 [2-9] a podle přístroje AirVoid Analyser se zřetelně liší. Dále jsou v Tab. 5-2 uvedeny údaje o obsahu účinného vzduchu, tedy vzduchu přítomném v pórech o velikosti 0,001-1,0 mm, průměrné velikosti pórů a spacing faktoru. Tyto výsledky jsou zpracovány podle ČSN EN 480-11 [2-11]. Velikost spacing faktoru je ve všech měřeních menší než 0,2 mm, což je uspokojivá hodnota z hlediska odolnosti betonu proti zmrazování a rozmrazování.

**Tab. 5-1** Tabulka vlastností čerstvého betonu dle jednotlivých receptur

Receptura	Sednutí [mm]	Rozlití [mm]	Objemová hmotnost [g.cm <sup>-3</sup> ]	Obsah vzduchu [%]
1	110	435	2250	2,8
2	60	410	2315	2,7
3	60	385	2315	2,5

**Tab. 5-2** Parametry naměřené přístrojem AirVoid Analyser

Receptura	Vzorek	Celkový obsah vzduchu [%]	Obsah účinného vzduchu [%]	Spacing faktor [mm]	Průměrná velikost pórů [mm]
1	R1	10,4	5,2	0,089	0,118
	R2	11,4	6,3	0,071	0,109
2	A	4,5	2	0,150	0,118
	B	4,4	2,1	0,116	0,087
3	A	3,1	1,7	0,099	0,065
	B	2,7	1	0,179	0,108

### 5.2 Pevnost betonu v tlaku a objemová hmotnost

Pevnost betonu v tlaku i objemová hmotnost byla stanovena na třech zkušebních tělesech pro každou recepturu, krychlích o hraně délky 150 mm. Průměrná pevnost betonu v tlaku po 28 dnech byla 21,4 ; 33,2 a 44,9 N.mm<sup>-2</sup>, objemová hmotnost 2292, 2307 a 2317 kg.m<sup>-3</sup>.

Tab. 5-3 Pevnost betonu v tlaku po 28 dnech

Receptura	Označení tělesa	Síla $F_c$ (kN)	Rozměry těles (mm)			pevnost v tlaku $f_{cc}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	
			šířka	délka	výška	jednotlivá	$\Phi$ zaokr.
1	R1	481	150,5	150,3	150,0	21,3	21,4
	R2	491	151,3	150,9	148,0	21,5	
	R3	485	150,2	150,2	150,4	21,5	
2	A1	754	150,2	150,1	150,3	33,5	33,2
	B1	754	150,7	150,4	150,5	33,3	
	C1	746	150,5	150,3	150,2	33,0	
3	A2	1023	150,2	150,4	151,7	45,3	44,9
	B2	998	149,9	149,9	151,4	44,4	
	C2	1017	150,4	150,5	150,8	44,9	

Tab. 5-4 Objemová hmotnost zkušebních těles

Receptura	Označení tělesa	Hmotnost (kg)	Rozměry těles (mm)			objemová hmotnost $\rho_s$ [kg/m <sup>3</sup> ]	
			šířka	délka	výška	jednotlivá	průměrně
1	R1	7,721	150,5	150,3	150,0	2277	2292
	R2	7,774	151,3	150,9	148,0	2302	
	R3	7,783	150,2	150,2	150,4	2296	
2	A1	7,781	150,2	150,1	150,3	2298	2307
	B1	7,851	150,7	150,4	150,5	2303	
	C1	7,874	150,5	150,3	150,2	2319	
3	A2	7,972	150,2	150,4	151,7	2326	2317
	B2	7,874	149,9	149,9	151,4	2315	
	C2	7,883	150,4	150,5	150,8	2309	

### 5.3 Mrazuvzdornost a odolnost proti vodě a rozmrazovacím látkám

#### 5.3.1 Mrazuvzdornost

##### Receptura 1

Výsledky zkoušky mrazuvzdornosti betonu receptury 1 na zkušebních trámcích jsou zobrazeny v následujících dvou tabulkách (Tab. 5-5, 5-6). Součinitel mrazuvzdornosti  $k_{CSN}$  podle ČSN 73 1322 [2-2] je po 50 cyklech 64,36%. Relativní dynamický modul dle [2-2] po 50 cyklech RDM je po 50 cyklech 61,24-62,50%, po 25 cyklech 69,50-74,54%. Beton receptury 1 tedy není mrazuvzdorný na 50 ani 25 cyklů.

Tab. 5-5 Výsledky zkoušky mrazuvzdornosti receptury 1

0 cyklů	$E_{dyn,U}$ [MPa]	$E_{dyn,FL}$ [MPa]	$E_{dyn,FF}$ [MPa]	$f_{cf,m}$ [MPa]	$f_c$ [MPa]	m [g]	úbytek hm.
R1	36,5	33,3	33,6	3,4	24,6	9 273	
R2	37,3	33,9	33,8	3,4	23,8	9 231	
R3	32,8	30,4	29,7	3,3	21	9 108	
R4	37,3	33,9	33,4	-	-	9 227	
R5	33,0	31,0	31,5	-	-	9 127	
R6	34,7	32,9	33,4	-	-	9 261	
R7	36,2	33,1	33,7	-	-	9 191	
R8	35,8	32,8	33,4	-	-	9 324	
R9	34,6	32,0	32,4	-	-	9 209	
25 cyklů							
R4	23,5	20,9	20,6	-	-	9 227	0,00%
R5	27,6	24,8	24,5	-	-	9 234	-1,17%
R6	26,5	22,9	23,1	-	-	9 276	-0,16%
R7	28,8	24,6	25,4	-	-	9 196	-0,05%
R8	21,8	18,0	18,5	-	-	9 336	-0,13%
R9	27,8	24,7	25,0	-	-	9 225	-0,17%
50 cyklů							
R4	21,8	19,5	19,9	2,3	23,1	9 219	0,09%
R5	25,4	22,3	22,1	2,2	22,6	9 230	0,04%
R6	22,6	18,2	18,4	1,9	20,4	9 273	0,03%
R7	25,5	20,1	20,5	2,3	22,3	9 191	0,05%
R8	19,7	16,5	16,9	2	21,5	9 331	0,05%
R9	26,4	22,1	22,6	2,3	21,9	9 220	0,05%

Tab. 5-6 Relativní součinitele mrazuvzdornosti receptury 1

	zmrazovací cykly		
	0	25	50
$RDM_{(U)}$	100,00%	73,54%	69,50%
$RDM_{(FL)}$	100,00%	69,50%	61,24%
$RDM_{(FF)}$	100,00%	69,74%	61,24%
$k_{\check{C}SN}$	100,00%	-	64,36%

## Receptura 2

Výsledky zkoušky mrazuvzdornosti betonu receptury 2 na zkušebních trámcích jsou zobrazeny v následujících dvou tabulkách (Tab. 5-7, 5-8). Součinitel mrazuvzdornosti  $k_{\check{C}SN}$  podle ČSN 73 1322 [2-2] je po 50 cyklech 78,63% a po 100 cyklech 60,68%. Relativní dynamický modul RDM dle [2-2] je po 50 cyklech 84,12-88,40% a po 75 cyklech 70,08-73,17%. Beton receptury 2 je tedy mrazuvzdorný na 50 cyklů.

Tab. 5-7 Výsledky zkoušky mrazuvzdornosti receptury 2

0 cyklů	$E_{dyn,U}$ [MPa]	$E_{dyn,FL}$ [MPa]	$E_{dyn,FF}$ [MPa]	$f_{cf,m}$ [MPa]	$f_c$ [MPa]	m [g]	úbytek hm.
0/1-1	37,0	34,6	35,0	3,6	30,3	9 374	
0/1-2	38,7	37,0	37,3	4	33,9	9 456	
0/1-3	37,3	35,3	35,6	4,1	31,2	9 335	
0/1-4	37,4	35,3	35,6	-	-	9 355	
0/1-5	37,3	35,7	35,8	-	-	9 350	
0/1-6	37,5	35,6	35,8	-	-	9 347	
0/1-7	36,9	34,8	35,3	-	-	9 351	
0/1-8	37,6	35,8	35,3	-	-	9 363	
0/1-9	37,5	36,1	36,2	-	-	9 428	
25 cyklů							
0/1-4	34,8	33,7	33,9	-	-	9 371	-0,17%
0/1-5	35,4	34,6	34,5	-	-	9 365	-0,16%
0/1-6	34,1	33,8	33,7	-	-	9 359	-0,13%
0/1-7	33,8	33,3	33,2	-	-	9 361	-0,12%
0/1-8	34,0	33,6	34,2	-	-	9 376	-0,14%
0/1-9	34,1	33,8	34,0	-	-	9 443	-0,15%
50 cyklů							
0/1-4	30,7	31,0	30,7	3,3	31	9 371	-0,17%
0/1-5	30,6	30,3	29,6	2,7	29,4	9 367	-0,18%
0/1-6	30,7	30,7	30,9	3,2	28	9 362	-0,16%
0/1-7	32,7	32,1	31,5	-	-	9 364	-0,14%
0/1-8	32,2	32,8	32,1	-	-	9 380	-0,18%
0/1-9	32,2	31,8	30,9	-	-	9 445	-0,18%
75 cyklů							
0/1-7	28,4	27,9	27,4	-	-	9 374	-0,25%
0/1-8	26,3	26,2	24,9	-	-	9 392	-0,30%
0/1-9	26,0	24,0	22,9	-	-	9 455	-0,28%
100 cyklů							
0/1-7	20,9	21,3	20,6	2,6	29,8	9 374	-0,25%
0/1-8	20,1	20,1	19,5	2,3	29,7	9 393	-0,32%
0/1-9	20,4	18,8	18,2	2,2	30,7	9 458	-0,31%

Tab. 5-8 Relativní součinitele mrazuvzdornosti receptury 2

	zmrazovací cykly				
	0	25	50	75	100
$RDM_{(U)}$	100,00%	91,73%	84,12%	71,80%	54,63%
$RDM_{(FL)}$	100,00%	95,00%	88,40%	73,17%	56,40%
$RDM_{(FF)}$	100,00%	94,83%	86,53%	70,08%	54,33%
$k_{\check{C}SN}$	100,00%	-	78,63%	-	60,68%

**Receptura 3**

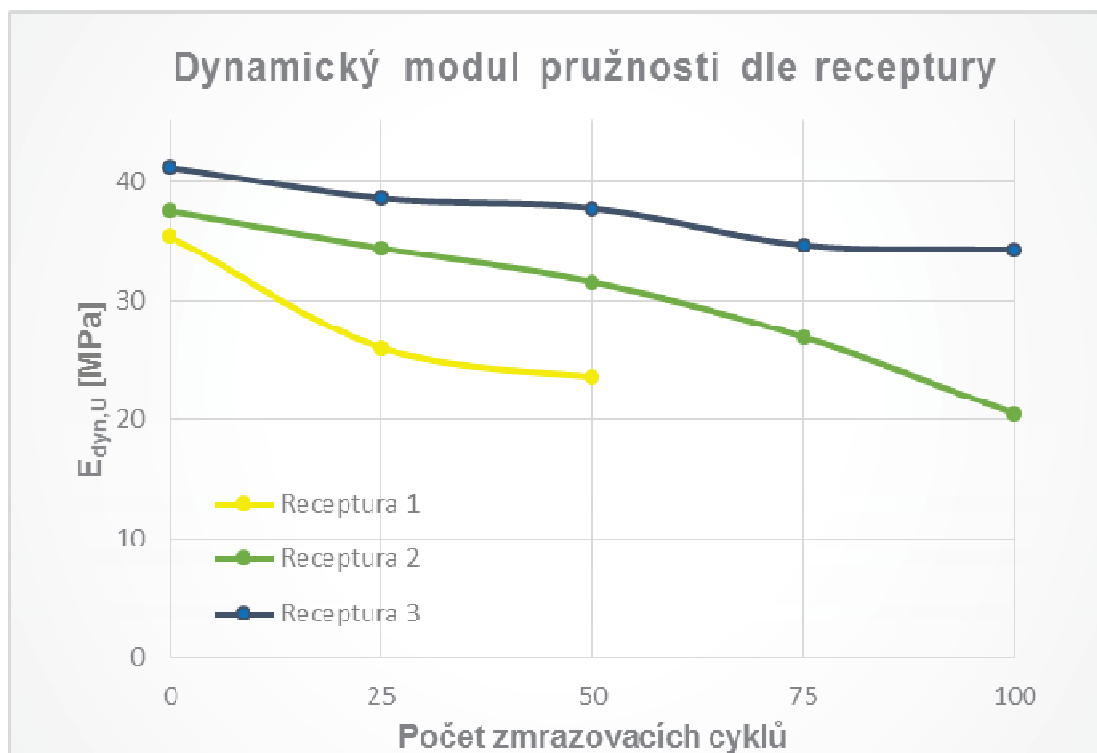
Výsledky zkoušky mrazuvzdornosti betonu receptury 3 na zkušebních trácích jsou zobrazeny v následujících dvou tabulkách (Tab. 5-9, 5-10). Součinitel mrazuvzdornosti  $k_{\text{ČSN}}$  podle ČSN 73 1322 [2-2] je a po 50 cyklech 93,10% po 100 cyklech 83,18%. Relativní dynamický modul RDM dle [2-2] je po 50 cyklech 91,60-94,15% a po 100 cyklech 83,18-89,98%. Beton receptury 3 je tedy mrazuvzdorný na 100 cyklů.

**Tab. 5-9** Výsledky zkoušky mrazuvzdornosti receptury 3

0 cyklů	$E_{\text{dyn,U}}$ [MPa]	$E_{\text{dyn,FL}}$ [MPa]	$E_{\text{dyn,FF}}$ [MPa]	$f_{\text{cf,m}}$ [MPa]	$f_c$ [MPa]	m [g]	úbytek hm.
0/2-1	41,3	40,1	39,8	5,8	51,8	9 364	
0/2-2	41,2	40,2	40,0	5,8	51,1	9 401	
0/2-3	40,7	40,2	40,7	5,8	48	9 380	
0/2-4	41,5	40,3	39,9	-	-	9 479	
0/2-5	40,9	39,5	39,1	-	-	9 386	
0/2-6	41,5	40,7	40,7	-	-	9 363	
0/2-7	41,1	39,9	40,0	-	-	9 356	
0/2-8	40,9	39,6	39,6	-	-	9 300	
0/2-9	41,3	40,2	40,6	-	-	9 378	
25 cyklů							
0/2-4	38,7	38,5	38,1	-	-	9 478	0,01%
0/2-5	38,4	37,8	37,3	-	-	9 383	0,03%
0/2-6	39,6	39,1	39,0	-	-	9 360	0,03%
0/2-7	37,7	37,8	37,6	-	-	9 356	0,00%
0/2-8	38,2	37,7	37,7	-	-	9 294	0,06%
0/2-9	38,5	38,2	38,1	-	-	9 378	0,00%
50 cyklů							
0/2-4	38,8	38,7	38,3	5,4	46,9	9 482	-0,03%
0/2-5	38,2	37,8	37,0	5,3	48	9 387	-0,01%
0/2-6	39,0	38,8	38,8	5,5	49,2	9 369	-0,06%
0/2-7	36,6	37,0	36,9	-	-	9 363	-0,07%
0/2-8	37,1	37,7	37,5	-	-	9 303	-0,03%
0/2-9	36,5	36,4	36,4	-	-	9 387	-0,10%
75 cyklů							
0/2-7	34,3	35,4	36,2	-	-	9 358	-0,02%
0/2-8	35,8	37,1	37,1	-	-	9 294	0,06%
0/2-9	33,8	35,5	35,5	-	-	9 378	0,00%
100 cyklů							
0/2-7	33,8	35,5	35,5	5,5	43,9	9 366	-0,11%
0/2-8	35,3	37,2	37,1	5,7	44,4	9 296	0,04%
0/2-9	33,6	35,2	35,5	5,1	44,3	9 386	-0,09%

Tab. 5-10 Relativní součinitele mrazuvzdornosti receptury 3

	Zmrazovací cykly				
	0	25	50	75	100
$RDM_{(U)}$	100,00%	93,59%	91,60%	84,15%	83,18%
$RDM_{(FL)}$	100,00%	95,27%	94,15%	89,83%	89,74%
$RDM_{(FF)}$	100,00%	94,81%	93,60%	90,57%	89,98%
$k_{\text{ČSN}}$	100,00%	-	93,10%	-	93,68%



**Graf 5-1** Vývoj dynamického modulu pružnosti zkušebních trámů v závislosti na počtu zmrazovacích cyklů

Beton receptury 1 je mrazuvzdorný na méně než 25 cyklů, beton receptury 2 a 3 je mrazuvzdorný na 50 a 100 cyklů. Ačkoliv měl nejlepší výchozí parametry pro docílení nejvyšší mrazuvzdornosti podle přístroje AirVoid Analyser beton receptury 2, beton receptury 3 je mrazuvzdorný na více cyklů. Můžeme tedy říci, že mrazuvzdornost betonu je mnohem více závislá na dávkování cementu než na porozimetrii.

### 5.3.2 Odolnost betonu proti vodě a chemickým rozmrazovacím látkám

V Tab. 5-11 jsou zobrazeny odpady betonu ze zkušebních těles po  $n$  zmrazovacích cyklech podle jednotlivých receptur betonu. Přestože požadovaný počet zmrazovacích cyklů byl 100, došlo k rozpadu zkušebních těles již po 25, respektive 50 cyklech. Přičemž zkušební těleso je považováno podle ČSN 73 1326 [2-3] za rozpadlé pokud je odpad betonu více než  $3000 \text{ g.m}^{-2}$ , popř. procento částic větší než 4 mm je více než 20% z hmotnosti celkového odpadu betonu. Odpad betonu přepočtený na  $\text{g.m}^{-2}$  je k dispozici v Tab. 5-12.

**Tab. 5-11** Odpady betonu ze zkušebních těles po  $n$  cyklech

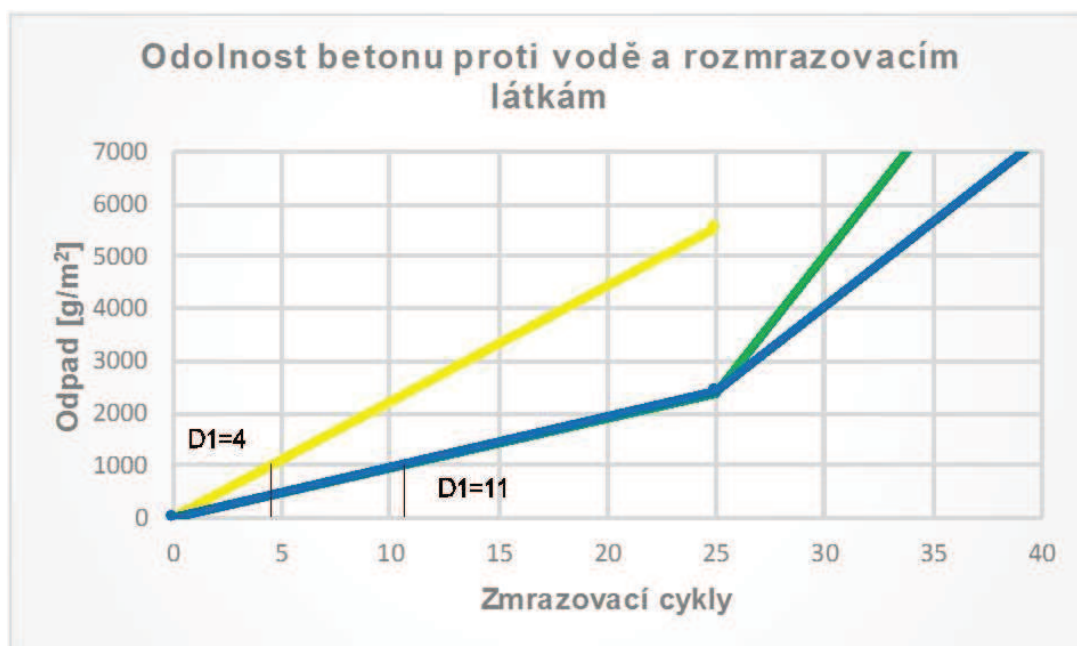
Receptura	Označení vzorku	Rozměry tělesa [mm]			Odpad po cyklech [g]		
		l	b	h	25	50	75
1	1	150,2	150,0	150,3	110,4	ROZPAD	-
	2	150,1	149,9	149,5	96,1	ROZPAD	-
	3	150,3	149,8	150,1	169,3	ROZPAD	-
2	1	150,4	150,6	150,3	49	454,7	ROZPAD
	2	149,8	150,0	150,1	53,9	287	ROZPAD
	3	150,1	150,4	150,2	56,9	312,3	ROZPAD
3	1	149,8	149,9	150,4	52,2	112,5	ROZPAD
	2	150,0	150,0	149,8	53,9	287	ROZPAD
	3	149,9	150	150,8	56,9	312,3	ROZPAD

**Tab. 5-12** Odpad betonu ze zkušebních těles po  $n$  cyklech v  $\text{g.m}^{-2}$

Receptura	Označení vzorku	Odpad po cyklech [ $\text{g.m}^{-2}$ ]			Odpad po cyklech, průměr [ $\text{g.m}^{-2}$ ]		
		25	50	75	25	50	75
1	1	4900	ROZPAD	-	5564	ROZPAD	-
	2	4271	ROZPAD	-			
	3	7519	ROZPAD	-			
2	1	2163	20075	ROZPAD	2361	15560	ROZPAD
	2	2399	12773	ROZPAD			ROZPAD
	3	2520	13834	ROZPAD			ROZPAD
3	1	2325	5010	ROZPAD	2417	10552	ROZPAD
	2	2396	12756	ROZPAD			ROZPAD
	3	2531	13889	ROZPAD			ROZPAD

Zkouška odolnosti betonu proti vodě a chemickým rozmrazovacím látkám byla vyhodnocena podle kritéria D1, čili je stanoven počet zmrazovacích cyklů, po kterých je odpad betonu  $1000 \text{ g.m}^{-2}$  a těleso je narušené, viz. Graf 5-2. Receptura 1 je odolná proti 4 cyklům a receptura 2 a 3 proti 11 zmrazovacím cyklům.





Graf 5-2 Vyhodnocení odolnosti betonu proti vodě a rozmrazovacím látkám

## 5.4 Nedestruktivní metody hodnocení

### 5.4.1 Torrent Permeability Tester

Výsledky zkoušky TPT jsou zobrazeny v následujících tabulkách, Tab. 5-13,14,15. Zkouška byla provedena na třech zkušebních kvádrech, přičemž na každém tělese byla provedena tři měření, a to pro každou recepturu betonu. Pro vyhodnocení zkoušky TPT je nutné stanovit součinitel propustnosti  $k_T$ . V tabulkách jsou zobrazeny hodnoty součinitele propustnosti pro aktuální vlhkost betonu, které byly naměřeny přístrojem, i hodnoty přepočtené na 3% vlhkost betonu, což je nezbytné pro objektivní vyhodnocení zkoušky. Jako doplňková informace je uvedena hloubka vniknutí vakua.

Podle přepočtené hodnoty součinitele propustnosti byly jednotlivé receptury ohodnoceny jako špatná- pro recepturu 1, střední až dobrá- pro recepturu 2 a dobrá- pro recepturu 3. Betony tedy mají kvalitu betonové vrstvy 2 až 4 při hodnocení od jedné do pěti. Porovnání jednotlivých receptur podle součinitele propustnosti  $k_T$  je k dispozici v Grafu 5-3.

Tab. 5-13 Výsledky zkoušky TPT betonu receptury 1

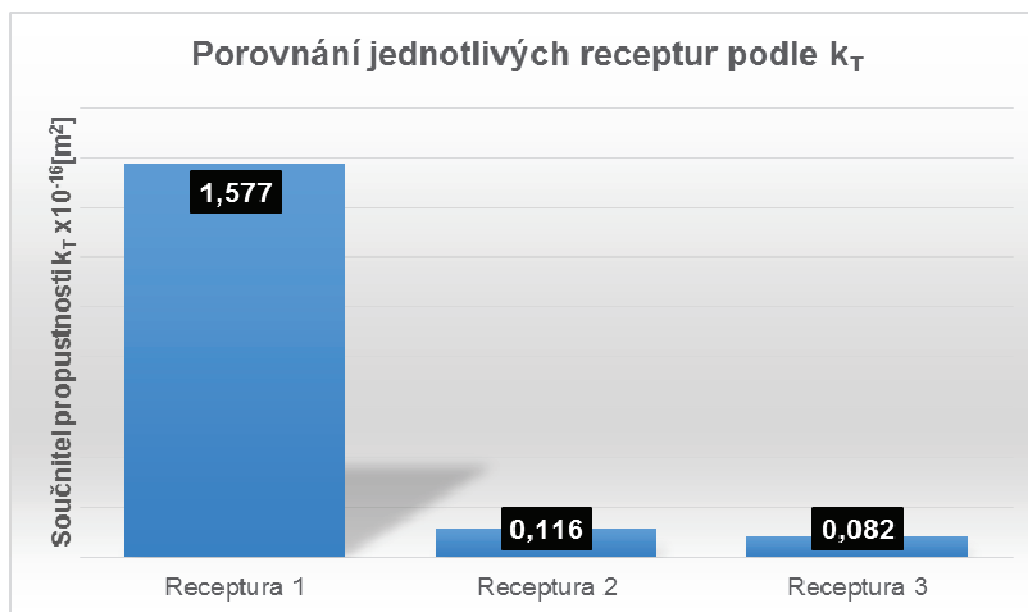
receptura 1	aktuální hmotnostní vlhkost	hodnota kt pro aktuální w	hodnota kt pro aktuální w	korekce hodnoty kt pro w=3%	korekce hodnoty kt pro w=3%	hloubka vniknutí vakua L	hloubka vniknutí vakua L	hloubka vniknutí vakua L	kvalita vrstvy betonu pro w=3%
	průměr	jedn.	průměr	průměr	celkově	jedn.	průměr	celkově	průměr
	[%]	$\cdot 10^{-16} \text{ m}^2$	$\cdot 10^{-16} \text{ m}^2$	$\cdot 10^{-16} \text{ m}^2$	$\cdot 10^{-16} \text{ m}^2$	[mm]	[mm]	[mm]	
R 1/1	3,72	1,587	1,634	1,896	1,577	57,7	56,3	54,9	špatná
		2,603				63,1			
		0,712				48,1			
R 1/2	3,68	1,562	1,172	1,226		57,4	52,8		špatná
		1,583				59,6			
		0,371				41,3			
R1/3	3,75	2,185	1,437	1,610		61,4	55,7		špatná
		1,015				52,3			
		1,110				53,4			

Tab. 5-14 Výsledky zkoušky TPT betonu receptury 2

receptura 2	aktuální hmotnostní vlhkost	hodnota kt pro aktuální w	hodnota kt pro aktuální w	korekce hodnoty kt pro w=3%	korekce hodnoty kt pro w=3%	hloubka vniknutí vakua L	hloubka vniknutí vakua L	hloubka vniknutí vakua L	kvalita vrstvy betonu pro w=3%
	průměr	jedn.	průměr	průměr	celkově	jedn.	průměr	celkově	průměr
	[%]	$\cdot 10^{-16} \text{ m}^2$	$\cdot 10^{-16} \text{ m}^2$	$\cdot 10^{-16} \text{ m}^2$	$\cdot 10^{-16} \text{ m}^2$	[mm]	[mm]	[mm]	
R 2/1	3,56	0,031	0,047	0,096	0,116	11,8	16,1	15,8	dobrá
		0,047				19,7			
		0,062				16,9			
R 2/2	3,67	0,041	0,041	0,101		13,5	13,6		střední
		0,038				13,1			
		0,044				14,2			
R 2/3	3,71	0,072	0,067	0,150		18,2	17,6		střední
		-				-			
		0,062				16,9			

Tab. 5-15 Výsledky zkoušky TPT betonu receptury 3

receptura 3	aktuální hmotnostní vlhkost	hodnota $k_t$ pro aktuální $w$	hodnota $k_t$ pro aktuální $w$	korekce hodnoty $k_t$ pro $w=3\%$	korekce hodnoty $k_t$ pro $w=3\%$	hloubka vniknutí vakua $L$	hloubka vniknutí vakua $L$	hloubka vniknutí vakua $L$	kvalita vrstvy betonu pro $w=3\%$
	průměr	jedn.	průměr	průměr	celkově	jedn.	průměr	celkově	průměr
	[%]	$\cdot 10^{-16} \text{ m}^2$	$\cdot 10^{-16} \text{ m}^2$	$\cdot 10^{-16} \text{ m}^2$	$\cdot 10^{-16} \text{ m}^2$	[mm]	[mm]	[mm]	
R 3/1	3,57	0,038	0,030	0,069	0,082	12,6	12,1	13,9	dobrá
		0,027				12,0			
		0,024				11,8			
R 3/2	3,42	0,052	0,052	0,088		15,6	15,4		dobrá
		0,031				12,1			
		0,073				18,4			
R 3/3	3,53	0,054	0,045	0,089		15,8	14,3		dobrá
		0,047				14,9			
		0,033				12,3			



Graf 5-3 Porovnání jednotlivých receptur podle součinitele propustnosti

#### 5.4.2 Germanns Water Permeability Test

Výsledky zkoušky GWT jsou zobrazeny v následujících tabulkách, Tab. 5-16,17,18. Zkouška byla provedena na třech zkušebních kvádrech, přičemž na každém tělese byla provedena tři měření a to pro každou recepturu betonu. Pomocí zkoušky GWT byla stanovena propustnost betonu. V tabulkách jsou zobrazeny hodnoty propustnosti betonu

pouze po ukončení měření, po 10 minutách měření se hodnota propustnosti nepodařila zjistit.

Hodnoty propustnosti betonu se pro jednotlivé receptury pohybovaly sestupně od  $3,66 \times 10^{-3}$ ,  $1,89 \times 10^{-3}$  do  $1,79 \times 10^{-3}$  mm/s. Přičemž beton, jehož propustnost je menší než  $0,66 \times 10^{-3}$  mm/s, lze považovat za trvanlivý (dle návodu na použití přístroje). Propustnost všech tří receptur je vyšší, a proto je považována za vysokou a můžeme očekávat nepříliš trvanlivý beton. Porovnání jednotlivých receptur je k dispozici v grafu 5-4.

**Tab. 5-16** Výsledky zkoušky GWT pro beton receptury 1

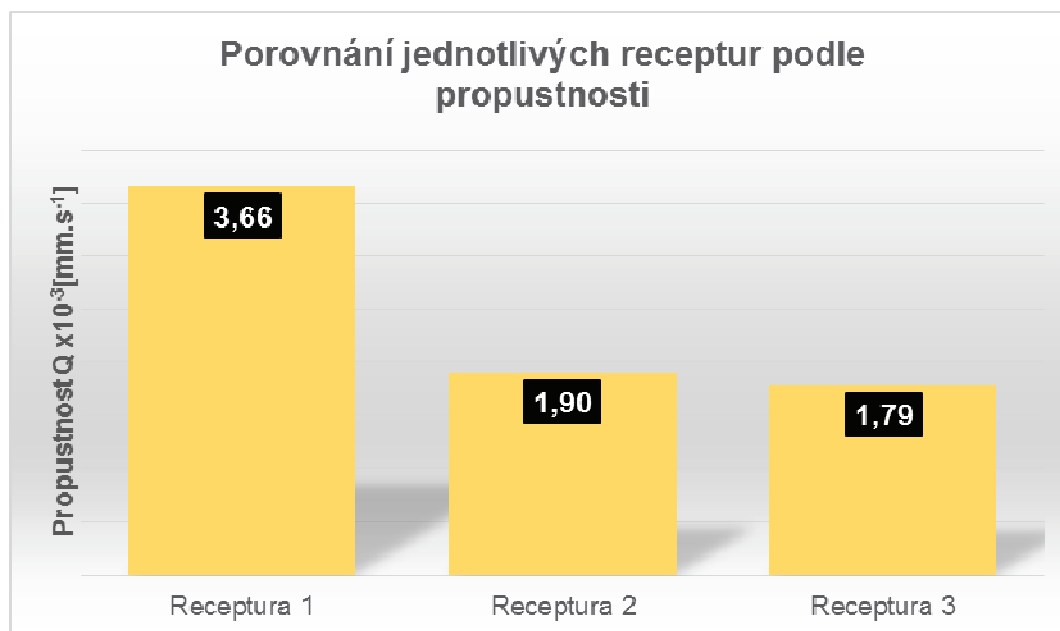
Receptura 1	aktuální hmotnostní vlhkost	propustnost v 10 min. měření	propustnost po ukončení měření	propustnost po ukončení měření	propustnost po ukončení měření	propustnost betonu
	průměr	jednotlivě	jednotlivě	průměr	celkově	průměr
	[%]	[mm/s]	[mm/s]	[mm/s]	[mm/s]	
R1/1	3,72	-	2,89E-03	3,18E-03	3,66E-03	vysoká
		-	3,47E-03			
R1/2	3,68	-	4,33E-03	4,33E-03		vysoká
		-	4,33E-03			
R1/3	3,75	-	3,47E-03	3,47E-03		vysoká
		-	3,47E-03			

**Tab. 5-17** Výsledky zkoušky GWT pro beton receptury 2

Receptura 2	aktuální hmotnostní vlhkost	propustnost v 10 min. měření	propustnost po ukončení měření	propustnost po ukončení měření	propustnost po ukončení měření	propustnost betonu
	průměr	jednotlivě	jednotlivě	průměr	celkově	průměr
	[%]	[mm/s]	[mm/s]	[mm/s]	[mm/s]	
R 2/1	3,56	-	2,48E-03	2,03E-03	1,90E-03	vysoká
		-	1,58E-03			
R 2/2	3,67	-	1,93E-03	2,20E-03		vysoká
		-	2,48E-03			
R 2/3	3,71	-	1,24E-03	1,49E-03		vysoká
		-	1,73E-03			

Tab. 5-18 Výsledky zkoušky GWT pro beton receptury 3

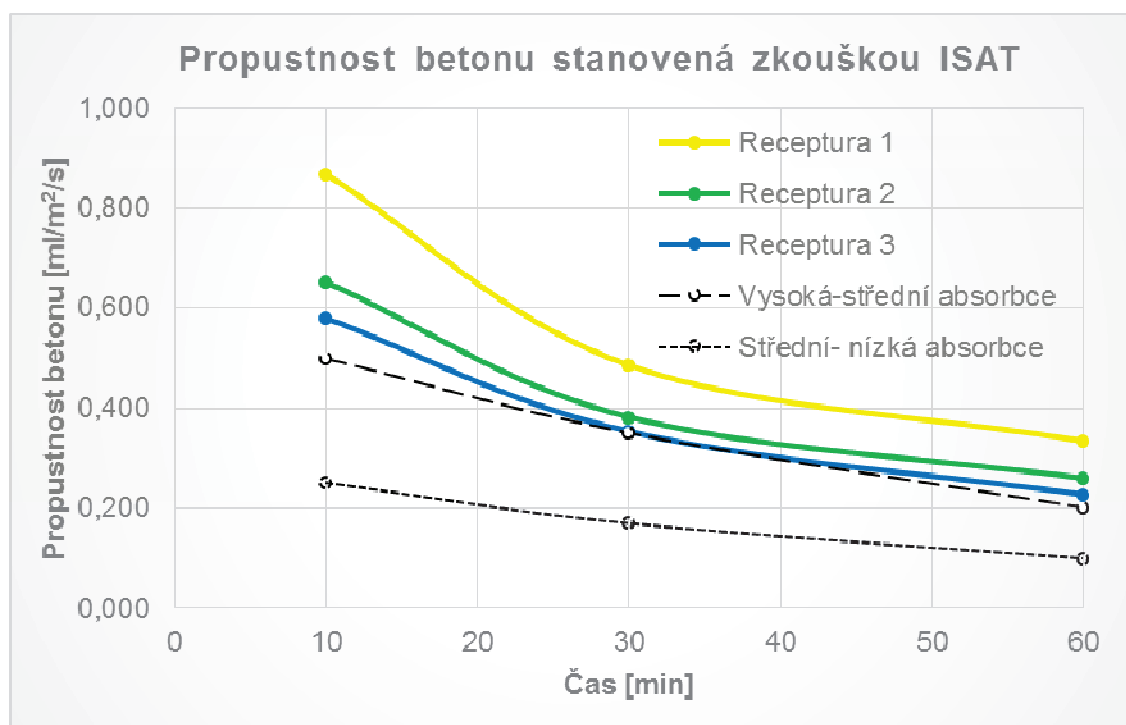
Receptura 3	aktuální hmotnostní vlhkost	propustnost v 10 min. měření	propustnost po ukončení měření	propustnost po ukončení měření	propustnost po ukončení měření	propustnost betonu
	průměr	jednotlivě	jednotlivě	průměr	celkově	průměr
	[%]	[mm/s]	[mm/s]	[mm/s]	[mm/s]	
R 3/1	3,57	-	2,48E-03	1,90E-03	1,79E-03	vysoká
		-	1,33E-03			
R 3/2	3,42	-	2,17E-03	1,87E-03		vysoká
		-	1,58E-03			
R 3/3	3,53	-	1,93E-03	1,58E-03		vysoká
		-	1,24E-03			

Graf 5-4 Porovnání jednotlivých receptur podle propustnosti  $Q$

### 5.4.3 Initial Surface Absorption Test

Výsledky zkoušky ISAT jsou uvedeny v Tab.5-19,20,21. Pro každou recepturu byla měřena propustnost na třech zkušebních kvádrech a to tak, že na každém tělese byly provedeny tři měření. Byla měřena propustnost po 10, 30 a po 60 minutách zkoušky. Na základě výsledků průměrné propustnosti byla ohodnocena absorpce betonu jako nízká, vysoká či střední. Jako střední byla absorpce betonu vyhodnocena u receptury 3 po 30 minutách. Ve všech ostatních měřeních, u všech receptur, byla absorpce vyhodnocena jako vysoká.

Výsledky propustnosti betonu jsou dále zobrazeny v Grafu 5-3, ve stejném grafu jsou zobrazeny i hranice pro vyhodnocení absorpce betonu. Je zřejmé, že u všech měření, kromě receptury 3 v 30. minutě, absorpce spadá do intervalu pro vysokou absorpci. Podle výsledků zkoušky tedy můžeme usuzovat, že beton bude disponovat nepříliš velkou trvanlivostí.



**Graf 5-5** Časový vývoj propustnosti, stanovené zkouškou ISAT

Tab. 5-19 Výsledky zkoušky ISAT po 10, 30 a 60 minutách pro recepturu betonu 1

Receptura 1	aktuální hmotnostní vlhkost	propustnost po 10 min od začátku testu	propustnost po 10 min od začátku testu	propustnost po 10 min od začátku testu	absorbce betonu
	průměr	jednotlivě	průměr	celkově	průměr
	[%]	[ml/m <sup>2</sup> /s]	[ml/m <sup>2</sup> /s]	[ml/m <sup>2</sup> /s]	
R1/1	3,72	0,695 0,907	0,801	0,868	vysoká
R1/2	3,68	1,094 0,846	0,970		vysoká
R1/3	3,75	0,774 0,893	0,833		vysoká
	aktuální hmotnostní vlhkost	propustnost po 30 min od začátku testu	propustnost po 30 min od začátku testu	propustnost po 30 min od začátku testu	absorbce betonu
	průměr	jednotlivě	průměr	celkově	průměr
	[%]	[ml/m <sup>2</sup> /s]	[ml/m <sup>2</sup> /s]	[ml/m <sup>2</sup> /s]	
R1/1	3,72	0,389 0,500	0,444	0,486	vysoká
R1/2	3,68	0,599 0,480	0,540		vysoká
R1/3	3,75	0,417 0,531	0,474		vysoká
	aktuální hmotnostní vlhkost	propustnost po 60 min od začátku testu	propustnost po 60 min od začátku testu	propustnost po 60 min od začátku testu	absorbce betonu
	průměr	jednotl.	průměr	celkově	průměr
	[%]	[ml/m <sup>2</sup> /s]	[ml/m <sup>2</sup> /s]	[ml/m <sup>2</sup> /s]	
R1/1	3,72	0,265 0,332	0,299	0,334	vysoká
R1/2	3,68	0,435 0,340	0,388		vysoká
R1/3	3,75	0,279 0,352	0,316		vysoká



Tab. 5-20 Výsledky zkoušky ISAT po 10, 30 a 60 minutách pro recepturu betonu 2

Receptura 2	aktuální hmotnostní vlhkost	propustnost po 10 min od začátku testu	propustnost po 10 min od začátku testu	propustnost po 10 min od začátku testu	absorbce betonu	
	průměr	jednotlivě	průměr	celkově	průměr	
	[%]	[ml/m <sup>2</sup> /s]	[ml/m <sup>2</sup> /s]	[ml/m <sup>2</sup> /s]		
R2/1	3,56	0,684 0,605	0,645	0,652	vysoká	
R2/2	3,67	0,642 0,626	0,634		vysoká	
R2/3	3,71	0,640 0,715	0,677		vysoká	
	aktuální hmotnostní vlhkost	propustnost po 30 min od začátku testu	propustnost po 30 min od začátku testu		propustnost po 30 min od začátku testu	absorbce betonu
	průměr	jednotlivě	průměr		celkově	průměr
	[%]	[ml/m <sup>2</sup> /s]	[ml/m <sup>2</sup> /s]		[ml/m <sup>2</sup> /s]	
R2/1	3,56	0,437 0,326	0,382	0,382	vysoká	
R2/2	3,67	0,375 0,340	0,357		vysoká	
R2/3	3,71	0,365 0,450	0,407		vysoká	
	aktuální hmotnostní vlhkost	propustnost po 60 min od začátku testu	propustnost po 60 min od začátku testu		propustnost po 60 min od začátku testu	absorbce betonu
	průměr	jednotl.	průměr		celkově	průměr
	[%]	[ml/m <sup>2</sup> /s]	[ml/m <sup>2</sup> /s]		[ml/m <sup>2</sup> /s]	
R2/1	3,56	0,275 0,237	0,256	0,260	vysoká	
R2/2	3,67	0,271 0,233	0,252		vysoká	
R2/3	3,71	0,249 0,294	0,271		vysoká	

Tab. 5-21 Výsledky zkoušky ISAT po 10, 30 a 60 minutách pro recepturu betonu 3

Receptura 3	aktuální hmotnostní vlhkost		propustnost po 10 min od začátku testu		propustnost po 10 min od začátku testu		propustnost po 10 min od začátku testu		absorbce betonu	
	průměr		jednotlivě		průměr		celkově		průměr	
	[%]		[ml/m <sup>2</sup> /s]		[ml/m <sup>2</sup> /s]		[ml/m <sup>2</sup> /s]			
R 3/1	3,57		0,561		0,564		0,581		vysoká	
			0,567							
R 3/2	3,42		0,616		0,610				vysoká	
			0,603							
R 3/3	3,53		0,553		0,568				vysoká	
			0,583							
	aktuální hmotnostní vlhkost		propustnost po 30 min od začátku testu		propustnost po 30 min od začátku testu		propustnost po 30 min od začátku testu		absorbce betonu	
	průměr		jednotlivě		průměr		celkově		průměr	
	[%]		[ml/m <sup>2</sup> /s]		[ml/m <sup>2</sup> /s]		[ml/m <sup>2</sup> /s]			
R 3/1	3,57		0,377		0,379		0,353		vysoká	
			0,381							
R 3/2	3,42		0,352		0,348				střední	
			0,344							
R 3/3	3,53		0,334		0,333				střední	
			0,332							
	aktuální hmotnostní vlhkost		propustnost po 60 min od začátku testu		propustnost po 60 min od začátku testu		propustnost po 60 min od začátku testu		absorbce betonu	
	průměr		jednotl.		průměr		celkově		průměr	
	[%]		[ml/m <sup>2</sup> /s]		[ml/m <sup>2</sup> /s]		[ml/m <sup>2</sup> /s]			
R 3/1	3,57		0,259		0,260		0,227		vysoká	
			0,261							
R 3/2	3,42		0,223		0,212				vysoká	
			0,200							
R 3/3	3,53		0,217		0,210				vysoká	
			0,203							

## 5.5 Porozimetrie

V Tab. 5-22,23 jsou uvedeny souhrnné výsledky z rtuťové porozimetrie betonu receptury 1,2 a 3. Výsledky slouží jako podklad pro odhad pevnosti betonu z porozimetrie jak je uvedeno v kapitole 2.3. Pro výpočet je dále třeba znát konstanty  $C_1$ ,  $C_2$  a  $C_3$ , zohledňující poměr cementu k ostatním složkám betonu pro jednotlivé receptury.

$$C_1 = 0,125$$

$$C_2 = 0,152$$

$$C_3 = 0,181$$

**Tab. 5-22** Porozimetrie vzorků betonu receptury 1 a 2

Vzorek	Receptura 1				Receptura 2		
	A	B	C	průměr	A	B	průměr
Vniknutý objem rtuti [ $\text{cm}^3/\text{g}$ ]	0,0582	0,0614	0,0760	<b>0,0652</b>	0,0596	0,0716	<b>0,0656</b>
Plocha pórů [ $\text{m}^2/\text{g}$ ]	5,4398	5,3243	7,0153	<b>5,9265</b>	4,5552	6,1786	<b>5,3669</b>
Medián z průměrů pórů [ $\mu\text{m}$ ]	0,0839	0,0925	0,0874	<b>0,0879</b>	0,1448	0,1267	<b>0,1358</b>
Průměrný průměr pórů [ $\mu\text{m}$ ]	0,0428	0,0461	0,0434	<b>0,0441</b>	0,0524	0,0464	<b>0,0494</b>
Objemová hmotnost [ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ]	2,2177	2,2174	2,1302	<b>2,1884</b>	2,2145	2,1469	<b>2,1807</b>
Měrná hmotnost [ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ]	2,5465	2,5668	2,5419	<b>2,5517</b>	2,5514	2,5369	<b>2,5442</b>
Porozita [%]	12,91	13,61	16,20	<b>14,24</b>	13,20	15,37	<b>14,29</b>

**Tab. 5-23** Porozimetrie vzorků betonu receptury 3

Vzorek	Receptura 3				
	A	B	C	D	průměr
Vniknutý objem rtuti [ $\text{cm}^3/\text{g}$ ]	0,0654	0,0600	0,0593	0,0554	<b>0,0600</b>
Plocha pórů [ $\text{m}^2/\text{g}$ ]	7,2120	6,6052	6,2113	6,6193	<b>6,6620</b>
Medián z průměrů pórů [ $\mu\text{m}$ ]	0,0711	0,0674	0,0686	0,0605	<b>0,0669</b>
Průměrný průměr pórů [ $\mu\text{m}$ ]	0,0363	0,0363	0,0382	0,0335	<b>0,0361</b>
Objemová hmotnost [ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ]	2,1454	2,1690	2,1803	2,2044	<b>2,1748</b>
Měrná hmotnost [ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ]	2,4954	2,4937	2,5043	2,5108	<b>2,5011</b>
Porozita [%]	14,03	13,02	12,94	12,20	<b>13,05</b>

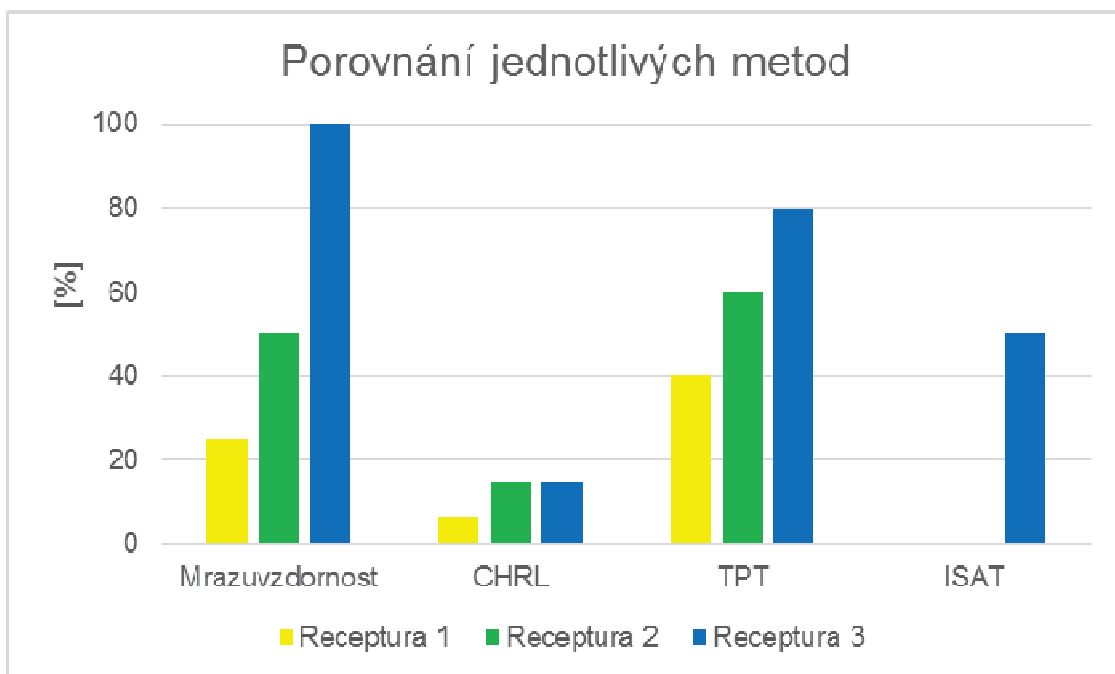
## 6 ZÁVĚR

### 6.1 Hodnocení trvanlivosti povrchové vrstvy betonu

Na třech recepturách betonu byla provedena celá řada zkoušek pro zjištění vlastností čerstvého betonu, betonu zatíženého zmrazovacími cykly i zkoušek propustnosti betonu. Receptury byly navrženy tak, aby se vzrůstajícím obsahem cementu disponovaly větší trvanlivostí. Všechny zkoušky skutečně potvrdily, že zvýšeným obsahem cementu docílíme větší trvanlivosti betonu. Zejména zkoušky propustnosti napovídají, že zvýšená trvanlivost betonu úzce souvisí s nižší propustností povrchu betonové vrstvy. Zvýšené dávkování cementu tedy zapříčiní snížení propustnosti betonu, což odpovídá předpokladům zpracovaným v teoretické části této práce. Výsledky z přístroje AirVoid Analyser a z porozimetrie naopak napovídají, že zvýšené dávkování cementu může zapříčinit menší provzdušnění betonu i větší spacing faktor, což může způsobovat zejména menší odolnost proti vodě a chemickým rozmrazovacím látkám. Tyto porozimetrické vlastnosti betonu však pravděpodobně ovlivňují délku trvanlivosti jen z části, jinak by nedošlo k jejímu zvýšení přidáním cementu. Je však nutné upozornit, že výjimka nastává u odolnosti betonu proti vodě a chemickým rozmrazovacím látkám. To je patrné podle receptury 2 a 3. Zkouška vyhodnotila shodnou odolnost, hodnocenou podle kritéria  $D_1=11$  cyklů, přestože má receptura 3 vyšší dávkování cementu i menší propustnost. Můžeme tedy potvrdit, že obsah účinného provzdušnění nad 2% a spacing faktor menší než 0,2 mm prospívá odolnosti betonu proti vodě a chemickým rozmrazovacím látkám. Je zřejmé, že pro odolnost betonu proti vodě a chemickým rozmrazovacím látkám hraje klíčovou roli provzdušnění betonu i jeho charakter.

Srovnání jednotlivých metod hodnocení trvanlivosti povrchové vrstvy betonu je vcelku obtížným úkolem. Jak vyplynulo z výsledků, srovnání mrazuvzdornosti a odolnosti betonu proti vodě a chemickým rozmrazovacím látkám dost dobře nelze provést, protože charakter vlivu prostředí je jiný. Pokud je beton mrazuvzdorný, tak to nemusí znamenat, že bude i odolný proti vodě a chemickým rozmrazovacím látkám. Při porovnání výsledků se zkouškami propustnosti můžeme prohlásit, že všechny tři zkoušky (TPT, GWT, ISAT) vystihly trend lepší trvanlivosti betonu v závislosti se snižující se propustností. Přesnější srovnání není možné, protože jednotlivé zkoušky měří propustnost jinými způsoby. TPT měří součinitel vzduchové propustnosti  $k_T [m^2]$ ,

GWT vodní propustnost  $Q$  [mm/s] a ISAT vodní propustnost  $ISA$  [ml/m<sup>2</sup>/s]. Jednotky GWT a ISAT si tedy odpovídají. Řádově jsou však zcela odlišné z důvodu jiných podmínek při měření (zejména tlak vody). Jediným způsobem jak metody porovnat je využít stupně kvality betonu, který lze stanovit podle výrobce. TPT lze rozdělit do 5 a ISAT do 3 tříd. GWT bohužel disponuje pouze jednou prahovou hodnotou ( $Q=0,66 \times 10^{-3}$  mm/s), která rozděluje beton na trvanlivý či netrvanlivý. V následujícím grafu 6-1 je k dispozici srovnání metod, pokud jednotlivé stupnice hodnocení převedeme na procenta. U mrazuvzdornosti je uvažována za 100% hodnota 100 zmrazovacích cyklů, u odolnosti proti vodě a chemickým rozmrazovacím látkám 75 cyklů, u TPT 5. stupeň hodnocení a u ISAT 3. stupeň hodnocení po 30 minutách zkoušky. Metoda GWT zde nemohla být kvůli svému nedostatečně podrobnému hodnocení porovnána.



**Graf 6-1** Porovnání jednotlivých metod hodnocení povrchové vrstvy betonu

Z grafu je patrné, že nejvíce shodné měření vykazují zkoušky mrazuvzdornosti a součinitel propustnosti získaný přístrojem Torrent Permeability Tester. Ostatní metody měření propustnosti se díky svému nedostatečně podrobnému hodnocení, jeví jako nedostatečně vypovídající.

Na základě výsledků experimentu můžeme prohlásit, že zkoušky propustnosti nedokáží účinně předpovědět trvanlivost povrchové vrstvy, a to zejména z toho důvodu, že propustnost je pouze jednou charakteristikou, která ovlivňuje trvanlivost povrchové vrstvy betonu. Přesnost předpovědi trvanlivosti by se dala zlepšit, kdyby byly do odhadu zakomponovány i charakteristiky pórové struktury a odhad byl zvlášť zpracován

za účelem posouzení mrazuvzdornosti nebo odolnosti proti vodě a chemickým rozmrazovacím látkám.

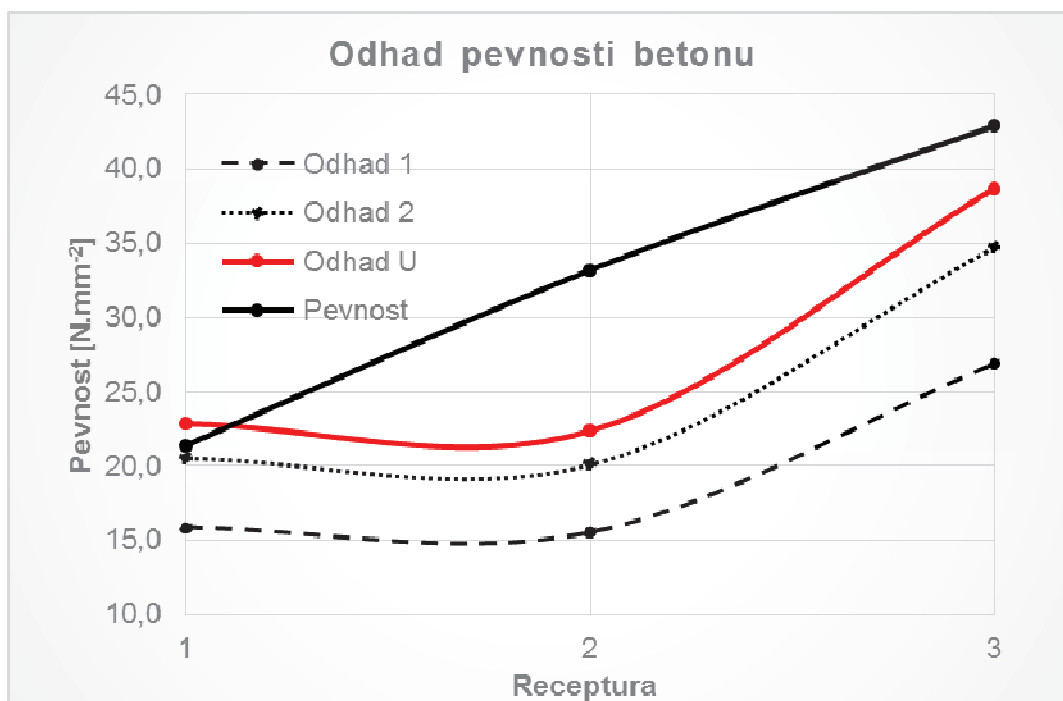
## 6.2 Odhad teoretické pevnosti betonu na základě jeho porozimetrie

Na základě vztahu (1) a (2) v kapitole 2.3 byla odhadnuta pevnost betonu v tlaku. Pro odhad je třeba znát poměr cementu  $C$  k ostatním složkám v receptuře, porozitu betonu  $p$  a střední hodnotu průměru vzduchového póru  $r_m$ , zjištěného z porozimetrie betonu. Dále je třeba určit konstantu  $K$ . Z experimentů, uvedených v kapitole 2.3 je patrné, že konstanta  $K$  se má určovat zvlášť pro každou recepturu betonu.

Pro odhad 1 pevnosti betonu byla použita konstanta podle experimentu Kumara a Bhattacharje [3-6],  $K_I=1390 \text{ N.m}^{-1,5}$ . Pro odhad 2 byla použita konstanta podle experimentu Dase a Kondraivendhana [3-7],  $K_2=1796 \text{ N.m}^{-1,5}$ . Pro upravený odhad U, byla použita konstanta  $K_U=2000 \text{ N.m}^{-1,5}$ , která vykazuje pro tento experiment nejlepší odhad. Je třeba poznamenat, že porozimetrie receptury 2 je průměrem ze dvou zkoušených vzorků. Výsledky z těchto dvou měření vykazují značné odchylky od výstupů, které se daly vzhledem k ostatním výsledkům očekávat. Zejména střední hodnota průměru pórů se značně liší. Pokud přihlídneme k porozimetrii receptury 1 a 3 (Tab. 5-22, 23), očekávali bychom přibližně poloviční hodnoty velikosti pórů. Pro úplnost tohoto experimentu budou výhledově vyhotovena další měření porozimetrie receptury 2. Pokud výsledky porozimetrie receptury 2 vyloučíme, můžeme konstatovat, že odhad pevnosti při použití konstanty  $K_U=2000 \text{ N.m}^{-1,5}$  lehce nadhodnocuje odhady pro nižší pevnosti a pro vyšší pevnosti betonu naopak odhady lehce podhodnocuje. Při použití konstanty  $K_I=1796 \text{ N.m}^{-1,5}$  jsou odhady pro nižší pevnosti vcelku výstižné, vyšší pevnosti jsou již značně podhodnoceny. S konstantou  $K_I=1390 \text{ N.m}^{-1,5}$  jsou všechny odhady zřetelně podhodnocené. Odhady jsou k dispozici v Tab.6-1 a vyneseny v grafu 6-2.

**Tab. 6-1** Odhadnuté pevnosti betonu

	Odhad 1 [N.mm <sup>-2</sup> ]	Odhad 2 [N.mm <sup>-2</sup> ]	Odhad U [N.mm <sup>-2</sup> ]	Pevnost [N.mm <sup>-2</sup> ]
Receptura 1	15,9	20,5	22,9	21,4
Receptura 2	15,5	20,1	22,4	33,2
Receptura 3	26,9	34,8	38,7	42,9



**Graf 6-2** *Odhad pevnosti betonu v tlaku z porozimetrie betonu*

Vzhledem ke značné citlivosti odhadu pevnosti betonu na přesnosti výstupu ze zkoušky porozimetrie se obtížně hodnotí přesnost vztahů (1) a (2). Podle výsledků experimentu je však zcela patrné, že vztahy jsou založeny na správných úvahách a bylo by třeba provést měření ve větším rozsahu na základě lépe podložených výstupů z porozimetrie betonu. Tuto úvahu podporuje i skutečnost, že obsah vzduchu v betonu stanovený podle tlakové metody, pomocí přístroje AirVoid Analyser a rtuťovém porozimetru se značně liší. Tyto nepřesnosti zřejmě pramení z kombinace mnoha faktorů. Kromě lidského faktoru a chyb techniky působí největší nepřesnosti opakovatelnost, reprodukovatelnost a přesnost použitých metod (zejména u tlakové metody a přístroje AirVoid Analyser). U porozimetrie pramení chyby z malé velikosti vzorků, které dostatečně nevystihují heterogenitu betonu a z malého počtu provedených měření.



## 7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

### 7.1 Skripta a opory

- [1-1] PIERRE-CLAUDE AITCIN. Vysokohodnotný beton. Praha: Informační centrum ČKAIT, 2005. ISBN 80-86769-39-9.
- [1-2] A.M. NEVILLE. *Properties of concrete*. England: Pearson Education Limited, 1995. ISBN 0-582-23070-5.
- [1-3] DOMONE, Peter and ILLSTONE, John, *Construction Materials-Their Nature and Behaviour*. London and New York: Spoon Press, 2001. ISBN 0-203-92757-5

### 7.2 Normy

- [2-1] ČSN EN 12390-8. *Zkoušení ztvrdlého betonu-Část 8: Hloubka průsaku tlakovou vodou*. 2009.
- [2-2] ČSN 73 1322. *Stanovení mrazuvzdornosti betonu*. 1968
- [2-3] ČSN 73 1326. *Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek (změna Z1-2003)*. 1985
- [2-4] ČSN P CEN/TS 12390-9. *Zkoušení ztvrdlého betonu- Část 9: Odolnost proti zmrazování a rozmrazování- Odlupování*. 2007
- [2-5] ČSN 73 1380 *Stanovení odolnosti betonu proti zmrazování a rozmrazování- Porušení vnitřních struktur*. 2007
- [2-6] ČSN EN 12350-2 *Zkoušení čerstvého betonu - Část 2: Zkouška sednutím*. 2009
- [2-7] ČSN EN 12350-5 *Zkoušení čerstvého betonu - Část 5: Zkouška rozlitím*. 2009
- [2-8] ČSN EN 12350-6 *Zkoušení čerstvého betonu - Část 6: Objemová hmotnost*. 2009
- [2-9] ČSN EN 12350-7 *Zkoušení čerstvého betonu - Část 7: Obsah vzduchu-Tlakové metody*. 2009
- [2-10] ČSN EN 12390-3 *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*. 2009
- [2-11] ČSN EN 480-11 *Přísady do betonu, malty a injektážní malty - Zkušební metody - Část 11: Stanovení charakteristik vzduchových pórů ve ztvrdlém betonu*. 2006

- [2-12] ČSN EN 123 90-7 *Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 7: Objemová hmotnost zkušebních těles*. 2009
- [2-13] ČSN EN 206-1 *Beton - Část 1: Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. 2001

### 7.3 Články

- [3-1] KADLECOVÁ, Zlata, ADÁMEK, Jiří a VYMAZAL, Tomáš. Hodnocení propustnosti NDT metodami jako podklad pro odhad aktuální trvanlivosti. *Beton: Technologie, konstrukce, sanace*. 2011, roč. 2011, č. 4.
- [3-2] CIKRLE, Petr a POSPÍCHAL, Ondřej. Nový způsob stanovení mrazuvzdornosti s využitím metod pro sledování poruch struktury. *Beton: Technologie, konstrukce, sanace*. 2011, roč. 2011, č. 3.
- [3-3] KUCHARCZYKOVÁ, Barbara, MISÁK, Petr a VYMAZAL, Tomáš. *Standardní operační postup pro přepočet hodnoty součinitele vzduchové propustnosti vzhledem k aktuální vlhkosti*.
- [3-4] TANESI, Jussara and MEININGER Richard, *Freeze-Thaw Resistance of Concrete With Marginal Air Content*. 2006
- [3-5] GOLOVÁ, M. *Souvislosti charakteristik provzdušněných betonů a jejich odolnosti proti vlivu prostředí*. Ostrava, 2012.
- [3-6] KUMAR, Rakesh and BHATTACHARJEE B., *Porosity, pore size distribution and in situ strength of concrete*. 2002
- [3-7] DAS, B.B, and KONDRAIVENDHAN, B., *Implication of pore size distribution parameters on compressive strength permeability and hydraulic diffusivity*, 2011

### 7.4 www zdroje

- www stránky

- [4-1] *Radon Seal*, 2013. Dostupné z WWW:  
<<http://www.radonseal.com/images/porosity-800px.gif>> čas 14:00, pondělí 28.10. 2013
- [4-2] *Federal Highway Administration*, 2013. Dostupné z WWW:  
<<http://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/pccp/04150/c/hapt8.cfm>> čas 14:00, pondělí 28.10. 2013
- [4-3] *Germann*, 2013. Dostupné z WWW:  
<<http://www.germann.org/Brochures/GWT.pdf>> čas 14:00, pondělí 28.10. 2013

## 8 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

$f_c$	Krychelná pevnost v tlaku [Pa]
$f_{cm}$	Charakteristická válcová pevnost v tlaku [Pa]
$F_c$	Síla při porušení vzorku [N]
$E_{dyn,U}$	Dynamický modul pružnosti z podélné rychlosti ultrazvuku [Pa]
$E_{dyn,FL}$	Dynamický modul pružnosti z podélné frekvence [Pa]
$E_{dyn,FF}$	Dynamický modul pružnosti z příčné frekvence [Pa]
$\sigma$	Napětí [Pa]
$\varepsilon$	Poměrné přetvoření [-]
$m$	Hmotnost zkušebního tělesa [g]
$\rho$	Objemová hmotnost [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]
$\rho_a$	Objemová hmotnost čerstvé směsi [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]
$A$	Průřezová plocha zkušebního tělesa [ $\text{m}^2$ ]
$r_m$	Střední hodnota průměru pórů v betonu [ $\mu\text{m}$ ]
$P, p$	Pórovitost [%]
$C$	Podíl cementu v betonu
$f_{ca}$	Faktor použitého kameniva
$f_e$	Faktor prostředí
$f_a$	Faktor stárí
$f_T$	Faktor teploty
$\kappa$	Empirická konstanta
$K$	Empirická konstanta
$RDM_{(F)}$	Relativní dynamický modul zjištěný z rezonanční zkoušky
$RDM_{(U)}$	Relativní dynamický modul zjištěný z rezonanční zkoušky
$Q$	Propustnost zjištěná z GWT [m/s]
$k_T$	Součinitel propustnosti zjištěný z TPT [ $\text{m}^2$ ]
$ISA$	Propustnost zjištěná z ISAT [ $\text{ml}/\text{m}^2/\text{s}$ ]
$k_{T,3}$	Součinitel propustnosti zjištěný z TPT, přepočtený na 3% vlhkost [ $\text{m}^2$ ]
$w$	vlhkost
$k_{\text{ČSN}}$	Součinitel mrazuvzdornosti dle ČSN 73 1322[2-2]

## 9 SEZNAM OBRÁZKŮ, GRAFŮ A TABULEK

### 9.1 Seznam obrázků

**Obrázek 2-1** *Propustnost betonu [4-1]*

**Obrázek 2-2** *Lom v přechodové oblasti [4-2]*

**Obrázek 2-3** *Pórová struktura betonu- pórovitý, nepropustný materiál; pórovitý, propustný materiál; velmi pórovitý, málo propustný materiál; málo pórovitý, velmi propustný materiál (ve směru hodinových ručiček) [1-3]*

**Obrázek 2-4** *Příklad zastoupení jednotlivých velikostí pórů v betonu (gelové póry, kapilární póry, záměrně přidané póry, póry vzniklé například nedokonalým zhutňováním) [3-5]*

**Obrázek 2-5** *Spacing faktor [3-5]*

**Obrázek 3-1** *Schéma upevnění, zkoušené krychle (1-opěrný kroužek, 2-těsnící kroužek, 3-opěrná deska, 4-upevňovací šroub, 5- tlaková voda) [2-1]*

**Obrázek 3-2** *Schéma zateplení zkoušeného vzorku [2-4]*

**Obrázek 3-4** *Souprava TPT [3-3]*

**Obrázek 3-5** *Měření vzdušné propustnosti přístrojem TPT [3-3]*

**Obrázek 3-3** *Měření vodní propustnosti přístrojem GWT [4-3]*

**Obrázek 3-6** *Příklad využití přístroje ISAT in-situ [1-3]*

**Obrázek 3-7** *Přístroj KAKASO [3-1]*

**Obrázek 3-8** *Schéma principu rtuťového porozimetru*

**Obrázek 4-1** *Přeprava betonu pro betonáž zkušebních těles*

**Obrázek 4-2** *Betonáž zkušebních těles*

**Obrázek 4-3** *Zkouška sednutím*

**Obrázek 4-4** *Zkouška přístrojem AirVoid Analyser*

**Obrázek 4-5** *Zkouška přístrojem Torrent Permeability Tester*

**Obrázek 4-6** *Zkouška přístrojem Germanns Water Permeability Test*

**Obrázek 4-7** *Stínovaná fotografie pórové struktury vzorku betonu receptury 3*

### 9.2 Seznam grafů

**Graf 2-1** *Závislost propustnosti na vodním čísle [1-2]*

**Graf 2-2** *Závislost propustnosti betonu na kapilární porozitě [1-2]*

**Graf 2-3** *Závislost propustnosti na stáří betonu [1-2]*

**Graf 2-4** *Závislost vzdušné propustnosti betonu ošetřovaného v suchých a vlhkých podmínkách na pevnosti v tlaku [1-2]*

**Graf 2-5** *Existující modely znázorňující závislost pevnosti betonu na porozitě*

**Graf 2-6** *Závislost pevnosti betonu na hlavní části výrazu z rovnic (1) a (2) [3-7]*

**Graf 3-1** *Cyklus chlazení zkušného vzorku [2-3]*

**Graf 3-2** *Vyhodnocení zkoušky v závislosti na odpadu betonu a počtu cyklů [2-3]*

**Graf 3-3** *Zmrazovací a rozmrazovací cyklus zkušného vzorku [2-4]*

**Graf 3-4** *Nomogram, sloužící jako pomůcka v vyhodnocení kvality krycí vrstvy [3-3]*

**Graf 5-1** *Vývoj dynamického modulu pružnosti zkušebních trámů v závislosti na počtu zmrazovacích cyklů*

**Graf 5-2** *Vyhodnocení odolnosti betonu proti vodě a rozmrazovacím látkám*

**Graf 5-3** *Porovnání jednotlivých receptur podle součinitele propustnosti*

**Graf 5-4** *Porovnání jednotlivých receptur podle propustnosti  $Q$*

**Graf 5-5** *Časový vývoj propustnosti, stanovené zkouškou ISAT*

**Graf 6-1** *Porovnání jednotlivých metod hodnocení povrchové vrstvy betonu*

**Graf 6-2** *Odhad pevnosti betonu v tlaku z porozimetrie betonu*

### 9.3 Seznam tabulek

**Tab. 3-1** *Stupně vlivu prostředí dle ČSN EN 206-1 [2-13]*

**Tab. 3-2** *Tabulka stupně porušení při daném odpadu [2-3]*

**Tab. 3-3** *Vyhodnocení kvality krycí vrstvy*

**Tab. 3-4** *Vyhodnocení zkoušky ISAT [3-1]*

**Tab. 5-1** *Tabulka vlastností čerstvého betonu dle jednotlivých receptur*

**Tab. 5-2** *Parametry naměřené přístrojem AirVoid Analyser*

**Tab. 5-3** *Pevnost betonu v tlaku po 28 dnech*

**Tab. 5-4** *Objemová hmotnost zkušebních těles*

**Tab. 5-5** *Výsledky zkoušky mrazuvzdornosti receptury 1*

**Tab. 5-6** *Relativní součinitele mrazuvzdornosti receptury 1*

**Tab. 5-7** *Výsledky zkoušky mrazuvzdornosti receptury 2*

**Tab. 5-8** *Relativní součinitele mrazuvzdornosti receptury 2*

**Tab. 5-9** *Výsledky zkoušky mrazuvzdornosti receptury 3*

**Tab. 5-10** *Relativní součinitele mrazuvzdornosti receptury 3*

**Tab. 5-11** *Odpady betonu ze zkušebních těles po n cyklech*

**Tab. 5-12** *Odpad betonu ze zkušebních těles po n cyklech v g.m-2*

**Tab. 5-13** *Výsledky zkoušky TPT betonu receptury 1*

**Tab. 5-14** *Výsledky zkoušky TPT betonu receptury 2*

**Tab. 5-15** *Výsledky zkoušky TPT betonu receptury 3*

**Tab. 5-16** *Výsledky zkoušky GWT pro beton receptury 1*

**Tab. 5-17** *Výsledky zkoušky GWT pro beton receptury 2*

**Tab. 5-18** *Výsledky zkoušky GWT pro beton receptury 3*

**Tab. 5-19** *Výsledky zkoušky ISAT po 10, 30 a 60 minutách pro recepturu betonu 1*

**Tab. 5-20** *Výsledky zkoušky ISAT po 10, 30 a 60 minutách pro recepturu betonu 2*

**Tab. 5-21** *Výsledky zkoušky ISAT po 10, 30 a 60 minutách pro recepturu betonu 3*

**Tab. 5-22** *Porozimetrie vzorků betonu receptury 1 a 2*

**Tab. 5-23** *Porozimetrie vzorků betonu receptury 3*

**Tab. 6-1** *Odhadnuté pevnosti betonu*